

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND  
Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituut

Lauri Lopp

## **Looduslikest kiujäätmetest geotekstiili valmistamine**

Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Materjaliteadus

Juhendaja: Tarmo Tamm, PhD

Tartu 2023

# Infoleht

## Looduslikest kiujäätmetest geotekstiili valmistamine

Umbes pool kogu maailmas ning üle 90% Eestis toodetud töötlemata lambavillast läheb madala kvaliteedi ja puhastusprotsessiga kaasneva suure veekulu tõttu hävitamisele. Käesoleva töö eesmärk oli uurida võimalusi pesemata lambavilla väärindamiseks sellest piiratud elueaga geotekstiili valmistades. Töös määrati Eestis saadavaloleva lambavilla omadused ning selles sisalduvate lisandite kogus ja koostis.

Purustatud pesemata lambavilla töötlemisel selgus, et vill on võimalik nõelviltimiseks sobivalt puhtaks saada juba 10 minutiga neutraalses keskkonnas 50 °C juures. Samuti leiti, et veeauru kasutamine töötlusprotsessis võib olla lahenduseks villa töötlemiseks vajaliku puhta vee koguse vähendamiseks. Viltimisprotsessi läbiviimine aurukeskkonnas hoiab viltimisnõela puhta ning parandab ka villa viltumist.

**Märksõnad:** piiratud elueaga geotekstiil, töötlemata lambavill, purustatud lambavill, nõelviltimine, aurutöötlus

**CERCS:** T150 Materjalitehnoloogia, T470 Tekstiilitehnoloogia

## Preparation of geotextile from natural fibre waste

Approximately half of all untreated sheep wool produced worldwide and over 90% in Estonia is currently being discarded due to low quality and environmental concerns associated with wool scouring. This study aimed to investigate the possibilities for value addition to raw wool by manufacturing limited-life geotextiles. The characteristics of locally available sheep wool were determined, including the content and composition of impurities.

It was found that treating raw wool for 10 minutes under neutral conditions at 50 °C is sufficient to achieve the necessary cleanliness for needle-punching. Additionally, it was found that the use of steam could be the solution to reduce the amount of clean water required for wool processing. Conducting the felting process in a steam environment keeps the felting needle clean and improves the felting of the wool.

**Keywords:** limited-life geotextile, raw sheep wool, shredded sheep wool, needle-punching, steam-treatment

**CERCS:** T150 Material technology, T470 Textiles technology

# Sisukord

Infoleht .....	2
Sisukord.....	3
Lühendite loetelu.....	5
Sissejuhatus .....	6
1. Kirjanduse ülevaade .....	7
1.1. Looduslikud kiud.....	7
1.1.1. Taimsed kiud .....	7
1.1.2. Loomsed kiud .....	7
1.1.2.1. Lambavill .....	8
1.1.2.2. Villa keemiline koostis ja struktuur .....	8
1.1.2.3. Töötlemata vill .....	9
1.1.2.4. Villa keemiline stabiilsus ja biolagunemine.....	9
1.2. Lausriie ja selle valmistamismeetodid .....	10
1.2.1. Toormaterjali ettevalmistus.....	10
1.2.1.1. Taimsete kiudude ettevalmistus .....	11
1.2.2.2. Lambavilla ettevalmistus.....	11
1.2.2.3. Lahendused lambavilla keskkonnasäästlikumaks puhastamiseks .....	12
1.2.2. Võrgu tekitamine.....	12
1.2.3. Võrgu sidumine .....	13
1.2.3.1. Looduslike kiudude viltimine.....	14
1.2.4. Materjali viimistlemine .....	14
1.3. Geotekstiilid .....	14
1.3.1. Geotekstiilide eluiga ja lagunemise mehhanismid .....	15
1.3.2. Tehislikest kiududest geotekstiilid .....	16
1.3.3. Looduslikest kiududest geotekstiilid .....	17
2. Eksperimentaalne osa .....	18
2.1. Kasutatud kemikaalid ja seadmed .....	18
2.2. Kasutatud materjalid ja nende karakteriseerimine .....	19
2.3. Villa puhtuse hindamine.....	19
2.4. Aluselise keskkonna mõju uurimine .....	20
2.5. Korduva pesemise katse .....	21
2.6. Viltimistest .....	21
2.7. Auruga töötlemine.....	21

3. Tulemused ja arutelu .....	22
3.1. Uuritud lambavilla karakteriseerimine .....	22
3.2. Villa puhtus .....	23
3.2.1. Purustamise mõju villavahale .....	23
3.3. Villa töötlemine .....	26
3.3.1. Pesemata villa viltimine .....	26
3.3.2. Aluseline töötlus .....	26
3.3.3. Temperatuuri mõju töötlusele .....	28
3.3.4. Töötluslahuse korduv kasutamine .....	28
3.3.5. Villa töötlemine neutraalses keskkonnas .....	29
3.3.6. Auruga töötlemine .....	30
Kokkuvõte .....	32
Kasutatud kirjandus .....	33
Lisa 1. Pesemata ja puhtast villast vilditud pallid .....	38

## Lühendite loetelu

OM – optiline mikroskoop

SEM – skaneeriv elektronmikroskoop

EDX – energiadiispersiivne röntgenspektroskoopia (ingl *energy-dispersive X-ray spectroscopy*)

ATR – nõrgendatud sisepeegeldus (ingl *attenuated total reflection*)

FT-IR – Fourier' teisendusega infrapunaspektroskoopia

UV-kiirgus – ultraviolettkiirgus

IP-spekter – infrapunaspekter

scCO<sub>2</sub> – superkriitiline süsihappegaas

KHT – keemiline hapnikutarve

ISO – Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon („International Organization for Standardization“)

## Sissejuhatus

Euroopa liigub järjest rohelisema ja keskkonnasõbralikuma majanduse poole. Üheks selle olulisemaks näiteks on 2019. aastal Euroopa Liidu ja Euroopa Komisjoni algatatud poliitiline strateegia – „Euroopa Roheline Kokkulepe“ („European Green Deal“), mille eesmärk on aastaks 2050 saavutada Euroopas kliimaneutraalsus, olles seejuures esimene kliimaneutraalne maailmajagu [1]. Selle kokkuleppe üheks alapunktiks on „Uus ringmajanduse tegevuskava“ („A new Circular Economy Action Plan“), mis näeb ette jäätmete koguse vähendamise ning pakendite taaskasutamise suurendamise [2]. Lisaks on võetud eesmärgiks istutada Euroopas aastaks 2030 kolm miljardit uut puud, et parandada Euroopa metsade kvaliteeti ja liigirikust [3]. Istutamise järgselt on oluline jälgida, et umbrohi ei varjaks esimestel vegetatsiooniperioodidel istikuid ning noored puud saaksid hästi juurduda. Üheks võimaluseks puud esimestel aastatel kaitsta on kasutada piiratud elueaga geotekstiili, mis kaitseb puud umbrohu eest. Kui puu enam umbrohu eest kaitset ei vaja, siis peab geotekstiil biolagunema, mistõttu on palju uuritud selle valmistamist looduslikest kiududest.

Maailmas leiab kasutust vaid veidi alla poole kogu lammastelt saadud töötlemata villast [4]. 2022. aastal oli Eestis kokku umbes 65 000 lammast. Ühelt lambalt saab aastas keskmiselt kaks kilogrammi villa, mis teeb aastaseks toodanguks Eestis umbes 130 t. Sellest villast leidis 2022. aastal kasutust vaid 7,75 t (6%), seega läheb üle 90% lammastelt saadud villast hävitamisele, selle asemel, et seda kasutusele võtta ja anda sellele lisandväärtust. Puhastusprotsessi suure veekulu tõttu leiab kasutust vaid kvaliteetne vill. [5]

Üheks võimaluseks tekkivat villajäädet kasutada, on valmistada sellest piiratud elueaga geotekstiili. Töötlemata lambavill sisaldab olulisel määral lämmastiku- ja kaaliumiühendeid, mis on taimedele olulised toitained. Seega aitaks lambavillast geotekstiil parandada ka mulla viljakust ning soodustaks istikute arengut [6,7]. Lisaks aitab villa võime vett siduda istikutel üle elada ka põuasemaid perioode. Kuna töötlemata lambavill sisaldab kuni 50% mustust, siis on sellest eelneva töötluseta geotekstiili valmistamine keeruline. [7,8]

Käesoleva töö eesmärk on uurida võimalusi töötlemata lambavilla jäätmetest piiratud elueaga geotekstiili valmistamiseks.

# 1. Kirjanduse ülevaade

## 1.1. Looduslikud kiud

2021. aastal toodeti maailmas üle 113 miljoni tonni tekstiilikiude, millest looduslikud kiud moodustasid ligikaudu 22,4% [9]. Looduslikud kiud saab jagada tselluloosi- ja valgupõhisteks, ehk taimset ja loomset päritolu kiududeks.

### 1.1.1. Taimsed kiud

Taimsed kiudud koosnevad peamiselt tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist. Erinevate taimsete kiudude koostis on toodud tabelis 1. Taimsete kiudude mehhaanilisi omadusi ja biolagunevust on palju uuritud ning on leitud, et kiu koostisel on neile oluline mõju.

Hemitselluloos on hargnenud ahelaga polüsahhariid, mis moodustab maatriksi tselluloosist mikrofibrillide ümber. Taimsete kiudude võime vett siduda on seotud hemitselluloosi suure hüdrofiilsuse ja amorfse struktuuriga. Suurem hemitselluloosi sisaldus kiududes tingib nende parema võime niiskust siduda. Kuna suur niiskusesisaldus kius tekitab hea elukeskkonna mikroorganismidele, siis suureneb sellega ka biolagunevus [10,11]. Selleks, et biolagunemine toimuks, peab veesisaldus olema vähemalt 10% [12].

Ligniin oma hüdrofoobsete omaduste tõttu vähendab kiu veemavust ning seega parandab vastupidavust bioloogilisele lagunemisele. Kuna ligniin omab suurt neelduvust UV-kiirguse piirkonnas, siis on kiudude fotolagunemine sõltuv peamiselt ligniinisaldusest [13,14]. Lagunemist UV-kiirguse ja mikroorganismide tõttu peetakse avatud tingimustes peamisteks lagunemise põhjusteks, seega sõltub taimsete kiudude eluiga oluliselt ligniini ja hemitselluloosi sisaldustest. Suurema ligniinisalduse ja väiksema hemitselluloosisaldusega kiude peetakse vastupidavamateks [15].

Taimsete kiudude tugevuse määrab tselluloosisaldus ning selle kristallilisus, olles suurem kõrgema tselluloosisalduse ja suurema kristallilisusega kiududes [10,11,16]. Suure ligniinisaldusega kiud on jäigad [16]. Kiudude elastsust mõjutab ka niiskusesisaldus – märgade kiudude Youngi moodul on väiksem kui kuivadel kiududel [17].

**Tabel 1.** Levinumate taimsete kiudude keemiline koostis protsentides

	Tselluloos	Hemitselluloos	Ligniin	Muu
Džuut	46,2–63 [16,18]	12,5–18 [16,18]	13,3–16,1 [16,19,20]	23,3 [16]
Lina	72,6 [16]	8,7 [16]	3,2 [16]	14,7 [16]
Kanep	70,8–72,5 [21]	14,4–16,7 [21]	2,38–3,02 [21]	0,79–1,81 [21]
Kookos	32,9–34,1 [16]	20,9–25,2 [16]	33,6–40,9 [16,22]	5,5–9,6 [16]

## 1.1.2. Loomsed kiud

Kuna töös uuritakse vaid lambavilla, siis loomsetest kiududest ülevaate andmisel keskendutakse vaid lambavillale.

### 1.1.2.1. Lambavill

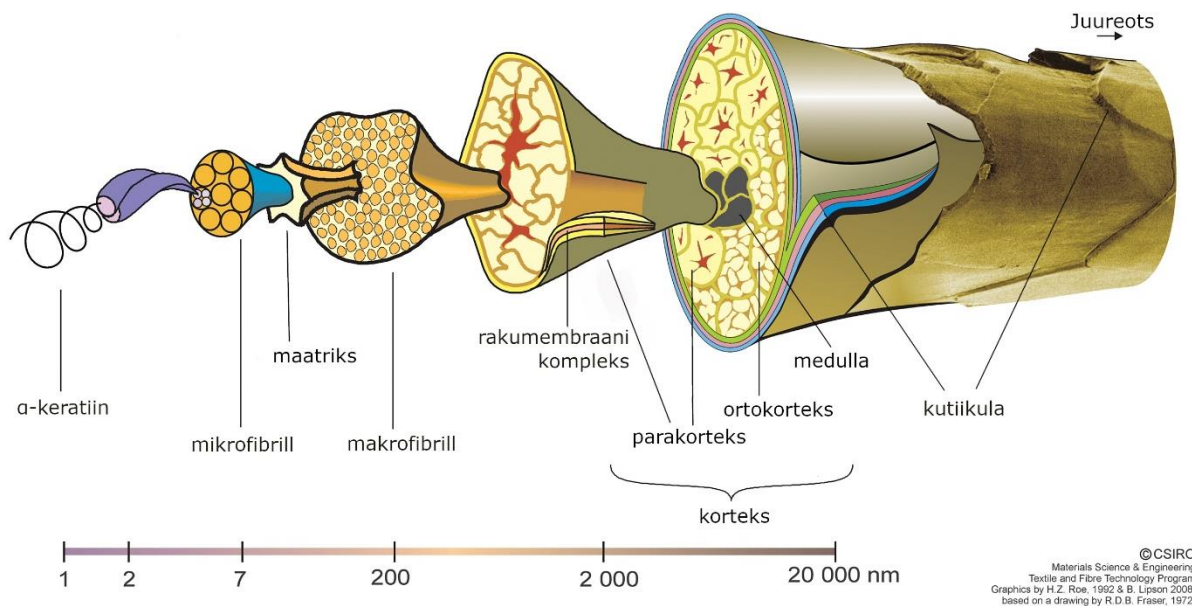
Lambavill on keerulise struktuuriga looduslik kiud, mille omadused sõltuvad oluliselt lambatõust. Näiteks võib kiu läbimõõt olla alates 10  $\mu\text{m}$  Delaine-Merino tõugu lammastel kuni üle 40  $\mu\text{m}$  Coopworth või Cotswold tõugu lammastel. Vastavalt kiu jämedusele liigitatakse: ülipeen vill ( $d < 18 \mu\text{m}$ ), peenvill ( $18 \mu\text{m} < d < 22 \mu\text{m}$ ), poolpeenvill ( $22 \mu\text{m} < d < 30 \mu\text{m}$ ) ja jämevill ( $d > 30 \mu\text{m}$ ). [23,24]

### 1.1.2.2. Villa keemiline koostis ja struktuur

Villa kiu keemiline koostis ja struktuur on väga sarnased juuste omaga. Lambavill on hierarhilise struktuuriga, koosnedes erinevatest kihtidest (Joonis 1).

Kõige pealmine kiht on kutiikula, mille moodustavad teineteise peal asetsevad soomused (ingl *scales*), mis paiknevad kalasoomuseid meenutaval põhimõttel. Kutiikula all on korteks, mis moodustab ligikaudu 90% kiu massist [25]. Eristatakse kahte tüüpi korteksi rakke: orto- ja parakorteks. Nende olemasolu ja jaotus kius põhjustavad selle säbarust ehk loogelisust. Ortokorteks seob endaga rohkem vett ja paisub seetõttu niisketes tingimustes rohkem, põhjustades kiu paindumist. Jämeda villa puhul on orto- ja parakorteks jaotunud kius kontsentriselt ning seega on lainelisust vähe, peene villa puhul aga bilateraalselt, seega on kiud lainelisemad. Korteks koosneb makrofibrillidest (pikkusega 100  $\mu\text{m}$  ning läbimõõduga 4–6  $\mu\text{m}$ ), mis omakorda koosnevad mikrofibrillidest, läbimõõduga umbes 10 nm. Mikrofibrillid koosnevad  $\alpha$ -keratiinist, mis on villa peamine koostisosa. Villakiu kõige sisemine kiht on medulla ehk karvasäsi, mis esineb vaid jämeda villa korral. Medulla võib koosneda õhuga täidetud rakukestade või olla seest tühi. [27,28]

Vill võib endaga siduda kuni 35% vett villa kuivmassist, suurt vee sidumise võimet seostatakse kõrge väävlühendite sisaldusega maatriksvalkudes. Villa veesisalduse kasvuga väheneb kiu elastsusmoodul ning kiud muutub elastsemaks. [29,30]



**Joonis 1.** Villa struktuur, kohandatud [30]

### 1.1.2.3. Töötlemata vill

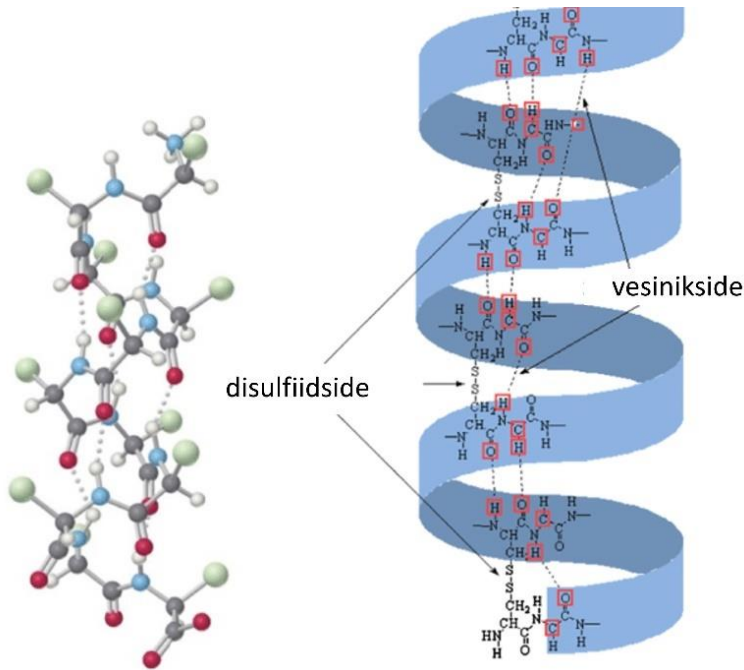
Värskelt põetud, töötlemata lambavill võib sisaldada 40–50% lisandeid, millest 5–20% moodustab villavaha ehk lanoliin. Lanoliin on lamba rasunäärmetest pärit estrite, alkoholide ja rasvhapete segu, mis koosneb peamiselt pikkade, üle 10 süsinikuga ahelatega vahaestritest, mis ei sisalda glütserooli estreid. Lanoliinis sisalduvad süsivesinikahelad võivad olla hargnenud või hargnemata ning sisaldada küllastamatust. Samuti sisaldab lanoliin steroidseid ühendeid. Lanoliin sulab temperatuuril 37–38 °C ning lahustub paljudes orgaanilistes lahustites, näiteks kloroformis ja etoksüetaanis. Lisaks sisaldab töötlemata vill mulda, taimset materjali ja rasuhigi. Rasuhigi sisaldab olulisel määral kaaliumiühendeid ning on lahustuv ka külmas vees. [7,31–34]

### 1.1.2.4. Villa keemiline stabiilsus ja biolagunemine

$\alpha$ -keratiin koosneb aminohapetest ning selle koostis varieerub kiu erinevate osade vahel. Aminohappeline koostis tagab villa hea vastupidavuse hapete suhtes. Happed küll hüdrolüüsivad peptiidrühmi, kuid ei mõjuta tertsiarstruktuuri moodustavaid disulfiidsidemeid (Joonis 2). Tugevalt aluselises keskkonnas disulfiidsidemed hüdrolüüsuvad ja pikaajaline töötlus hävitab kiu. [26]

Villa biolagunemine mullas toimub peamiselt mikroorganismide eritatud ensüümide mõjul ning algab disulfiidsidemete hüdrolüüsist. Esmalt toimub kutiikula lagunemine, millele järgneb makrofibrillide eraldumine ning korteksi lagunemine. Kuna korteks on ensümaatilisele

lagunemisele vastuvõtlikum, siis toimub selle lagunemine kiiremini kui kütikula lagunemine. Villa lagunemisel tekivad mulda lämmastikku, fosforit ja kaaliumit sisaldavad ühendid, mis on taimedele olulised toitained. [6,35,36]



**Joonis 2.**  $\alpha$ -keratiin villas, kohandatud [37]

## 1.2. Lausriie ja selle valmistamismeetodid

Lausriideks (ingl *nonwoven fabrics*) nimetatakse ISO järgi kiududest peamiselt tasapinnalisi materjale, millele on antud struktuurne terviklikkus füüsikaliste ja/või keemiliste vahenditega. Lausriideks ei loeta paberit ega kootud või heegeldatud materjale, samuti materjale, mille valmistamiseks on kasutatud sidelõnga või niiti. [54] Lausriidest materjalid on paljudes kohtades eelistatud kootud materjalidele nende madalama hinna ja kergema kaalu tõttu [44].

Lausriide valmistamisprotsessis saab eristada nelja põhilist etappi:

- 1) toormaterjali ettevalmistus,
- 2) võrgu tekitamine,
- 3) võrgu sidumine,
- 4) materjali viimistlemine [55,56].

### 1.2.1. Toormaterjali ettevalmistus

Edasi käsitleme lausriidest materjale ainult geotekstiilide näitel ning töö teema ja eesmärgi tõttu vaatleme lähemalt ainult looduslike kiudude saamist ja eeltöötlemist.

### 1.2.1.1. Taimsete kiudude ettevalmistus

Taimsete kiudude eraldamiseks vartest tuleb eemaldada mittekiuline kooreosa ning puitunud varre südamik. Esimeseks etapiks on kiudude leotamine, mille käigus toimub kontrollitud mittetselluloosse materjali lagunemine. Leotamine võib toimuda looduslikes tingimustes põllul, kus protsessi kiirus sõltub oluliselt ilmast ning võtab 4–5 nädalat. Vees leotamine toimub kontrollitud tingimustes külmas vees või 35–40 °C juures ning vett liigutatakse pidevalt läbi kiudude. Protsess on küll kiirem (1–2 nädalat külmas vees, 3–4 päeva tõstetud temperatuuril) kui põllul leotamine, kuid nõuab suuri koguseid puhast vett, mida tuleb pärast kasutamist puhastada. Protsessi kiirendamiseks kasutatakse tööstuslikult ka keemilist leotamist aluste, nõrkade hapete või ensüümidega. Leotamisel saadud kiud kuivatatakse ning eraldatakse mehaaniliselt. [57–59]

Suure ligniinisisaldusega kiud on jäigad ja seetõttu on nende edasine töötlemine keeruline. Säbaruse tekitamiseks taimsetesse kiududesse, näiteks džuuuti, kasutatakse nende töötlust naatriumhüdrosiidi (NaOH) lahusega. Protsessi kohta on aga avaldatud vastukäivaid tulemusi. Lewin jt (1959) leidsid, et maksimaalne säbarus tekkis džudikiududesse 9%-lise ja suurema NaOH sisaldusega lahusega töötlemisel ning temperatuuril 2 °C, temperatuuridel üle 40 °C säbarust ei tekkinud [60]. Efektiivset säbaruse tekitamist madalatel temperatuuridel kinnitas ka Ray jt (1983) tehtud uurimus [61]. Rony Mia jt (2017) töötlesid aga edukalt kiude ka 60 °C juures ning samuti on näidatud töötlemise toimimist ka toatemperatuuril või 30 °C ning 18% NaOH lahusega [62,63].

### 1.2.2.2. Lambavilla ettevalmistus

Töötlemata lambavilla ettevalmistuse esimene etapp on küürimine (ingl *scouring*), mille käigus eemaldatakse rasuhigi ja lanoliin. Küürimine toimub järjestikustes vannides (enamasti 6–8), milles on seebi või sünteetilise pesuaine ja aluse, enamasti naatriumkarbonaadi (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) lahused lahjenevas järjekorras. Viimased vannid on puhta veega ning mõeldud kiudude loputamiseks. Protsess toimub 45–55 °C juures. Küürimisel tekkivasse heitvette jäävad villavaha, lahustunud mustus, üleliigsed pesuained ja muud lahustunud orgaanilised ja anorgaanilised ühendid. [7,64]

Ühe kilogrammi puhta villa saamiseks kulub küürimisprotsessis umbes 20 liitrit puhast vett. Tekkiva heitvee keemiline hapnikutarve (KHT) on suur – 12,4–32,8 g/l. Euroopas kehtestatud piirnorm heitvee KHT-le on 125 mg/l võrdlusena kui puhtas pinnavees on KHT väärtus 20 mg/l. [8,65–67]

Peale küürimise võib lisaks olla tarvis taimse materjali eemaldamine villast, milleks kasutatakse karboniseerimist. Selle käigus töödeldakse villa 5–7% väävelhappe lahusega ning kuivatatakse seejärel 85–90 °C juures. Töötuse käigus muutub taimses materjalis olev tselluloos rabadaks hüdrotselluloosiks, mis on kergesti eemaldatav. [7]

### **1.2.2.3. Lahendused lambavilla keskkonnasäästlikumaks puhastamiseks**

Villa keskkonnasäästlikumaks puhastamiseks on uuritud heitvee korduvkasutamise võimalusi. Heitvee puhastamiseks on uuritud helvestusainete (ingl *flocculation agent*) kasutusvõimalusi. Tahke hüdroksiidi ja katioonse polüakrüülamiidi (CPAM) kasutamine orgaanilise materjali koaguleerimiseks võimaldas selle efektiivselt välja filtreerida ning kasutada puhastatud vett uuesti pesemiseks. Selliselt vett puhastades ja taaskasutades oli vee kulu ühe kilogrammi 35% lisandeid sisaldanud lambavilla puhastamiseks 2,5 liitrit. Lisaks näidati, et eraldatud sademest on võimalik saada kuuma alkoholiga ekstraheerides kätte lanoliin. [65]

Teise lahendusena on uuritud võimalusi kasutada superkriitilist süsihappegaasi ( $scCO_2$ ). On näidatud, et  $scCO_2$  suudab lahustada kuni 98% villavaha. Lisaks paranevad töötusel villa termilised omadused. Polaarsete ühendite lahustumine  $scCO_2$ -s on madal, seega on raskendatud vees lahustuva rasuhigi eemaldamine, samuti piirab tööstuslikku kasutuselevõtmist protsessis vajalik kõrge rõhk (kuni 40 MPa). [68]

### **1.2.2. Võrgu tekitamine**

Looduslikest kiududest võrgu tekitamiseks saab kasutada kahte erinevat meetodit: märgladumist (ingl *wet-layed*) ja kuivladumist (ingl *dry-layed*).

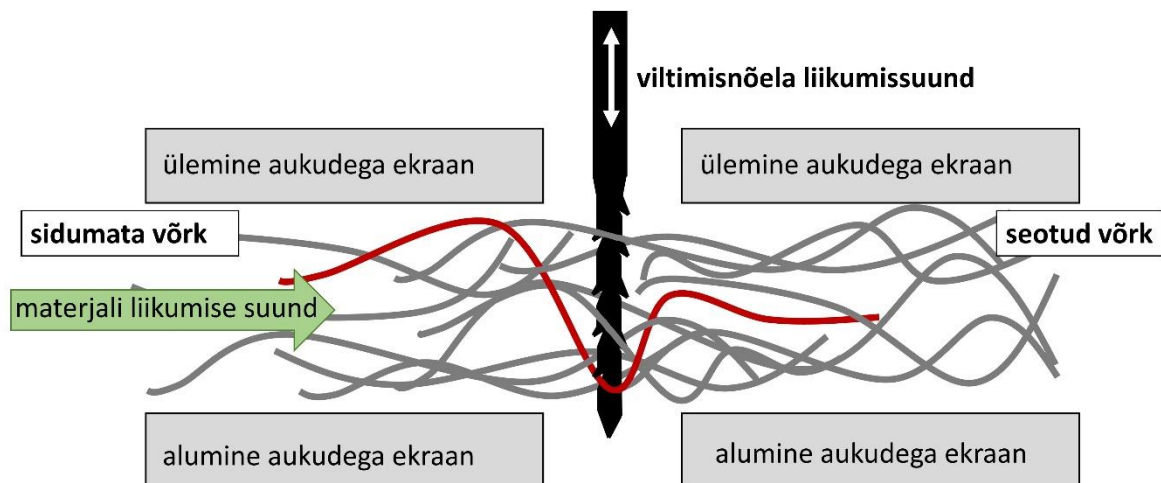
Märgladumine on enam kasutatud lühikeste kiudude jaoks (kiud pikkusega alla 10 mm), mida on võimalik vedelikes ühtlaselt hajutada [62,69]. Kiudude suspensiooni läbivale perforeeritud lindile või võrgule jääb ühtlane kiudude kiht, millest moodustuv tekstiil suunatakse edasi võrgu sidumisele. Tuntuimad märgladumise meetodil valmistatud materjalid on näiteks erinevad filtermaterjalid, märjad salvrätid ja kirurgilised kitlid [62].

Kuivladumisprotsessis kasutatakse seadmeid, mis töötlevad kiude kuivalt. Protsessi käigus kasutatakse pigem pikki kiude (12–100 mm). Toormaterjal kraasitakse ja lisaks võib toimuda kiudude orienteerimine kindlasse suunda või erinevalt orienteeritud kiukihtide ladumine. Tuntumad näited kuivladumisprotsessiga valmistatud materjalidest on geotekstiilid ja rõivaste voodrid. [55,56,62,69]

### 1.2.3. Võrgu sidumine

Võrgu sidumise etapis toimub pehme ning nõrga võrgu töötlemine selliselt, et kiud moodustaksid vastupidava materjali. Sidumiseks saab kasutada mehaanilisi, termilisi ja keemilisi meetodeid. Looduslike kiudude sidumiseks sobivad hästi mehaanilised meetodid, mille korral toimub võrgu sidumine mehaanilise mõjutamise kaudu. Selleks võib kasutada kidalisi nõelu (nõelviltimine, ingl *needle punching*) või veejugasid (hüdropõimimine, ingl *hydroentanglement*). Mehaanilise mõjutamise käigus toimub kiudude ümberpaiknemine ning põimumine. Nõelviltimine on ainus meetod, millega saab valmistada paksemaid ja raskemaid lausriidest materjale, mis on seejuures veel painduvad ja deformeeruvad (näiteks geotekstiilid). Nõelviltida saab nii looduslikke kui ka sünteetilisi kiude. [55,56,62]

Nõelviltimisprotsessis toimub kiudude põimimine kidaliste nõelte abil. Tööstuslikes seadmetes liigub sidumata võrk läbi seadme kahe aukudega ekraani vahel. Alumine ekraan kannab materjali edasi ning ülemine hoiab ära materjali nõelte külge jäämise. Joonisel 3 on toodud ühe viltimisnõela tööd kirjeldav skeem.



**Joonis 3.** Nõelviltimisprotsessi kirjeldav skeem, punasega märgitud kiud on nõela mõjul viidud läbi kraasitud materjali

Keemilised ja termilised sidumismeetodid on kasutatud põhiliselt sünteetilisest kiududest materjalide tootmisel. Termilise sidumise korral peab eelmises etapis valmistatud võrk sisaldama termoplasti, mis kuumutamise käigus sulab ning seob materjali tervikuks [56]. Materjali saab kuumutada lindiga läbi ahju kandes või kuumutatud kalendeerimisrullidega. Keemilise sidumise käigus kantakse võrgule vaak või lateks, mis tahkumisel tekitab tugeva ühenduse kiudude vahel. Kinnitava reagendi kandmine võrgule võib toimuda pihustades või võrgu küllastamisel reagentiga vannis. Materjali paremate omaduste saamiseks kasutatakse tihti korraga erinevaid sidumismeetodeid [62]. [55,56]

### **1.2.3.1. Looduslike kiudude viltimine**

Villa märgviltimise kirjeldamiseks on välja pakutud mehhanism, mis põhineb villa omapärasel struktuuril. On määratud, et kutiikularakkude avatud servade tõttu on hõõrdetegurid päri- ja vastusoomust liikudes erinevad. Seega on villakiududel mehhaanilise mõjutuse käigus eelistatud liikumissuund ning toimub põimumine. Põimumine on intensiivsem soojas ja niiskes keskkonnas. See on ka põhjuseks, miks villased riided liiga intensiivse pesu käigus pöördumatult kokku tõmbuvad. [26,70]

Soomuselise struktuuri puudumise tõttu ei ole taimsete kiudude märgviltimine võimalik ning saab kasutada vaid nõelviltimist [71]. Kõrge ligniinisaldusega taimsete kiudude, näiteks džuudivi nõelviltimine on keeruline, sest kiud purunevad viltimisprotsessi käigus. Kiudude pehmendamiseks pihustatakse neile mineraalõli ja vee emulsiooni ning hoitakse suletud anumas. Samuti kasutatakse mineraalseid õlisid ka viltimisnõelte kulumise vähendamiseks. [44] [72]

Nõelviltimiseks sobivad paremini pikemad kiud [62]. Viltimisprotsess on efektiivsem madala paindemooduliga kiudude korral, samuti paraneb viltumine, kui lisada vilditavast materjalist madalama paindemooduliga kiude. Näiteks villale kaseiinikiudude lisamine suhtes 20–80 andis 100% parema viltumise võrreldes vaid lambavilla viltimisega [73]. Kiudude säbarus aitab neil omavahel põimuda ning teineteise taha kinni jääda, seega viltuvad lainelisemad kiud paremini. [74]. Samuti on nõelviltimiseks oluline, et kiud sisaldaksid vähem kui 10% lisandeid [69].

Viltimise parandamiseks kasutatakse lisaks tugevdavat kangast. Toestava või tugevdava kanga kasutamisel on kiudude põimumine parem ning lisaks paraneb ka materjali taastumine pärast deformeerimist [75,76].

### **1.2.4. Materjali viimistlemine**

Viimistlemise etapis toimub valminud materjali puhastamine või lõpptootele lisandväärtuse andmine. Viimistlemise alla kuuluvad tegevused nagu pesemine, värvimine, UV-stabilisaatorite lisamine, kalendeerimine, lõikamine ja õmblemine. [55]

## **1.3. Geotekstiilid**

Geotekstiil on ISO („International Organization for Standardization“) järgi tasapinnaline, vedelikke läbilaskev sünteetiline või looduslik polümeerne tekstiilmaterjal, mida kasutatakse kokkupuutel pinnase või muude materjalidega geotehnoloogilistes või ehituslikes rakendustes [38]. Geotekstiilide üheks põhiliseks omaduseks on nende võime vedelikke läbi lasta, seetõttu on geotekstiilide peamiseks rakendusteks erinevate pinnasekihtide eraldamine, tugevdamine,

filtreerimine või kuivendus [39]. Samuti leiavad geotekstiilid rakendust põllumajanduses, aianduses ja haljastuses näiteks erosiooni ärahoidmiseks, umbrohu kasvu takistamiseks, mulla omaduste parendamiseks ja maapinna kaitsmiseks külmumise eest [40].

Geotekstiile saab kasutuse järgi jagada pika eluea ja piiratud elueaga geotekstiilideks. Piiratud elueaga geotekstiilid on mõeldud ajutiseks kasutamiseks ning peavad säilitama oma tugevusomadused vaid kindla aja jooksul [41]. Pika elueaga geotekstiile kasutatakse näiteks nõlvade või avatud maastike tugevdamiseks, kus on olulised nende erinevate tugevusnäitajate – sitkuse ja tõmbetugevuse pikaajaline säilimine. Erosiooni ärahoidmiseks ja taimestiku kasvu parandamiseks kasutatakse aga peamiselt piiratud elueaga geotekstiile. Nendes rakendustes on oluline geotekstiili võime niiskust siduda ning tõsta lagunedes mulla viljakust, et soodustada taimede kasvu, lisaks vähendada vihmapiiskade ja tuule mõju erosioonile ning alandada vihmavee äravoolukiirust. [10] Umbrohu kasvu takistamiseks peab geotekstiil olema piisavalt tihe, et blokeerida valgust [42,43].

Geotekstiilid saab jagada valmistamismeetodite järgi kaheks – kootud materjalist ja lausriidest geotekstiilid. Geotekstiilide hulgas domineerivad lausriidest materjalid nende parema läbilaskvuse, maapinnale kinnitumise ja ehitusliku vastupidavuse tõttu ning moodustasid 2022. aastal umbes 65,5% käibest [44,45].

Geotekstiile valmistatakse nii tehislisest kui naturaalistest kiududest. Toodetud geotekstiilide käibest moodustasid 2022. aastal 91,5% sünteetilistest materjalidest geotekstiilid ning oodatav nõudlus nende järele kasvab [45]. Naturaalistest kiududest geotekstiilide osatähtsus on väike, kuid nendele pööratakse järjest rohkem tähelepanu seoses kasvava vajadusega piiratud elueaga geotekstiilide järele [10,46].

### **1.3.1. Geotekstiilide eluiga ja lagunemise mehhanismid**

Geotekstiilide vastupidavuse (eluea) hindamiseks kasutatakse erinevaid mõõdetavaid suuruseid. Näiteks võib geotekstiili eluea lõpuks pidada seda, kui tema esialgne tõmbetugevus on vähenenud 50% või materjali pinnast moodustavad 2% sinna tekkinud augud [47]. Samas võivad erinevates rakendustes kasutatavad geotekstiilid oma eesmärki täita ka pärast selliselt defineeritud eluea lõppu. Näiteks leiti, et kookoskiud kaotab 12 kuuga kuni 80% oma esialgsest tõmbetugevusest, samas kui Ühendkuningriigi mäestikutingimustes on kookoskiust geotekstiil säilitanud oma erosiooni eest kaitsvad omadused ka pärast kolmeaastast kasutamist [48,49].

Eluea hindamiseks saab kasutada looduslikku ilmastikukindluse testi (ingl *natural weathering test*) või kiirendatud ilmastikukindluse testi (ingl *accelerated weathering test*). Looduslik ilmastikukindluse test annab usaldusväärsemaid tulemusi, kuid on väga ajamahukas samas kui

kiirendatud ilmastikukindluse test nõuab vähem aega, kuid selle tulemused on raskesti üle kantavad tegelikesse tingimustesse. [10] Kiirendatud ilmastikukindluse testi jaoks on erinevad ISO standardid, ning nende tulemuste ülekandmiseks reaalsesse tingimustesse on tehtud erinevaid analüüse [50–53].

Geotekstiilide eluea erinevates kasutuskohtades määravad erinevad degradatsioonimehhanismid: fotolagunemine (UV-kiirguse toimel), keemiline (oksüdeerumine või hüdrolyüs), termiline, radioaktiivne ja bioloogiline lagunemine [39]. Sõltuvalt kasutuskohast ning geotekstiili valmistamiseks kasutatud materjalist on erinevad mehhanismid erineva tähtsusega.

Geotekstiilide eluiga kasvab nende massi suurenedes (mass ühikulise pindalaga geotekstiili kohta), samuti on lausriidest geotekstiilidel avatud tingimustes lühem oodatav eluiga kui samast materjalist valmistatud kootud geotekstiilidel [50].

### **1.3.2. Tehislikest kiududest geotekstiilid**

Tehislikest kiududest kasutatakse geotekstiilide tootmiseks enim polüpropüleen (PP), millele järgnevad populaarsuselt poliüetüleenitereftalaat ja poliüetüleen. Lisaks on kasutusel mitmed polüamiidid ja kloori aatomeid sisaldavad polümeerid. [15]

Sünteetilisest materjalist geotekstiilide eluiga sõltub olulisel määral kasutustingimustest. Kaetud rakendustes võib geotekstiilide eluiga ulatuda 50 kuni 100 aastani [77,78]. Koerner ja tema uurimisgrupp (2017) määrasid aga sünteetilisest materjalist lausriidest geotekstiilide elueaks avatud tingimustes mõni kuu kuni pool aastat (aeg, pärast mida oli geotekstiili tõmbetugevus vähenenud poole võrra). Varem on PP kiudude elueaks avatud tingimustes määratud ka üle aasta [79]. Suur eluea vähenemine avatud kasutuse korral tuleneb kolmest peamisest lagunemismehhanismist – fotolagunemine UV-kiirguse toimel, termiline ja keemiline lagunemine. Termilise lagunemise põhjuseks on temperatuuri kõikumine, keemiline lagunemine intensiivistub hapniku parema ligipääsemise tõttu. Fotolagunemine muutub oluliseks, sest materjal on avatud UV-kiirgusele, mis lõhub polümeeri ahelaid. [50]

Kuna sünteetilised polümeerid ei ole biolagunevad, võivad need avatud rakendustes põhjustada keskkonnaprobleeme, näiteks mulla saastumist või mikroplastide kogunemist pinnasesse. Hiina rannikualadel on geotekstiilidest tulenev mikroplast oluline meresaaste allikas ning suurima osa saastest moodustab PP [80,81]. Samuti on probleemiks ajutised rakendused, pärast mida tuleb geotekstiil kokku korjata ning korrektselt utiliseerida. [15]

### 1.3.3. Looduslikest kiududest geotekstiilid

Looduslikest materjalidest valmistatud geotekstiilid sobivad biolagunevuse tõttu hästi ajutiseks kasutamiseks, näiteks erosiooni takistamiseks [46]. Taimsetest kiududest on geotekstiilide valmistamiseks uuritud näiteks džuudivast, kookosest, pilliroost, vesihüatsindist, linast ja palmilehtedest saadavaid kiude [10,82]. Enim on uuritud džuudivast ja kookoskiudu nende madala hinna ja hea kättesaadavuse tõttu. Nendest kiududest on saadaval ka kaubanduslikud tooted – punutud võrgud erosiooni takistamiseks ja lausriidest matid umbrohu tõrjeks [83,84]. [15]

Taimsed kiud võivad siduda endaga 20–120% niiskust sõltuvalt kiu liigist [10]. Taimsete kiudude suur veemavus võib olla probleemiks rakendustes, kus on oluline materjali tugevus, sest geotekstiili mass võib märgudes oluliselt suurenedada ning materjal võib enda raskuse all puruneda. Erosiooni kontrolliks ning taimestiku kasvu soodustamiseks on see aga üks suurimaid eeliseid sünteetilisest materjalidest geotekstiilide ees, luues taimedele paremad kasvutingimused ka kuivematel perioodidel. Samuti seostatakse taimsete kiudude suurt veemavust ka taimsete geotekstiilide väiksemate vee äravoolukiirustega [85]. Lisaks eralduvad geotekstiili biolagunemise käigus mulda taimedele olulised toitained. [15]

Sõltuvalt kasutatud kiududest võivad taimsete geotekstiilide eluead olla mõnest kuust kuni aastani [10,86,87]. Kiudude töötlemisel on võimalik geotekstiilide eluiga pikendada kuni 1,5 aastani [88]. Lambavillast geotekstiilide elueaks on sõltuvalt kasutuskeskkonnast määratud alla kuue kuu [86] ning üle aasta [35,89]. On näidatud, et samades keskkonnatingimustes on tselluloosipõhiste kiudude lagunemine kiirem kui villa lagunemine [36].

Lisaks taimsetele kiududele on looduslikest kiududest geotekstiilide valmistamiseks uuritud ka lambavilla. Villast geotekstiile on edukalt katsetatud erosiooni takistamiseks ning samuti mulla omaduste parandamiseks [35,86,89,90]. Lisaks on kaubanduslikult saadaval ka lambavilla ja džuudivast komposiitmaterjalist peenravaibad, kuid siiani on kasutatud selleks otstarbeks ainult pestud lambavilla [91].

Praegu kasutusel olevad lambavillast geotekstiilid on valmistatud pestud lambavillast, mille korral on kahju keskkonnale juba tekitatud. Samuti ei ole uuritud pesemata lambavillast lausriide valmistamise võimalusi. Sellest lähtuvalt on käesoleva töö fookuses minimaalse nõelviltilmist võimaldava puhastusmeetodi leidmine.

## 2. Eksperimentaalne osa

### 2.1. Kasutatud kemikaalid ja seadmed

Töö eksperimentaalses osas on läbivalt kasutaud Milli-Q<sup>®</sup> vett. Tabelis 2 on toodud töös kasutatud kemikaalid ning nende puhtus. Kemikaale kasutati eelnevalt puhastamata. Kõik töös kasutatud erineva pH-ga lahused valmistati naatriumhüdroksiidist kaalumise ja lahjendamiste teel. Lahuste valmistamiseks kasutati ultrahelivanni Bandelin DK 120 P. Valmis lahuste pH-d kontrolliti täiendavalt Elmetron CPC-411 pH-meetriga.

**Tabel 2.** Kasutatud kemikaalid

Nimetus	Keemiline valem	Puhtus	Tootja
Milli-Q vesi	H <sub>2</sub> O	Tüüp I	MilliporeSigma™
Naatriumhüdroksiid	NaOH	≥ 98,0%	Sigma-Aldrich
Etoksüetaan	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	≥99,8%	Honeywell, Reidel-de Haen™

Töös uuritud kiud olid purustatud tööstusliku purustusseadmega (ingl *shredder*) MÜTEK Systemtechnik MRZ 530 kasutades 40 mm sõela. Kiud karakteriseeriti Mitutoyo digitaalse mikromeetri ja joonlauga.

Proovide esmane vaatlus tehti Di-Li 900 stereomikroskoobiga. Suurema suurenduse saamiseks kasutati optilist mikroskoopi AmScope ME520T koos digitaalse kaameraga AmScope MU1803. Mikrograafide salvestamiseks ning proovide mõõtmiseks kasutati tootja poolt pakutavat tarkvara. SEM mikrograafid salvestati skaneeriva elektronmikroskoobiga Hitachi TM3000, kus kasutati tagasipeegeldunud elektronide detektorit ja elektrone kiirendavat pinget 15 kV. Proovid kaeti hõbedaga seadmes Leica EM ACE600. SEM ja OM mikrograafide kontrasti tõsteti pilditöötlusprogrammiga darktable.

Proovide kuivatamiseks kasutati vaakumkuivatusahju (edaspidi: vaakumahi) Memmert VO 200 toatemperatuuril. SEM-EDX analüüs viidi läbi SEM seadme küljes oleva Oxford Instruments Swift ED3000 röntgenspektromeetriga, mis kasutas räni-triiv detektorit. Analüüsiks kasutati elektrone kiirendavat pinget 15 kV.

Villavaha keemilise struktuuri määramiseks kasutati Bruker Optics Alpha I infrapunaspktromeetrit. ATR-FT-IR seadmes kasutati teemantkristalli ning seadmega mõõdeti vahemikus 500–4000 cm<sup>-1</sup>.

Kiudude töötlemiseks auruga kasutati Tefal Access Steam Force käsi-aurukeskust.

## 2.2. Kasutatud materjalid ja nende karakteriseerimine

Töös uuriti Eestis kasvatatud lammastelt saadud villa. Lambavill saadi kokkuostja käest, seega oli vill segu erinevat tõugu lammaste villadest. Pestud lambavilla korral saadakse viltimiseks sobiv võrk kraasimise teel. Kuna pesemata lambavilla kraasimisel saastuks kraas villavahaga, siis uuriti võrgu tekitamiseks purustatud villa.

Purustatud villa kiudude karakteriseerimiseks mõõdeti nende diameeter ning pikkus. Kiudude läbimõõdu määramiseks mõõdeti 40 juhuslikult valitud kiudu mikromeetriga ja pikkuse hindamiseks 40 juhuslikult võetud kiudu joonlauaga (purustamata villa korral mõõdeti 20 juhuslikult valitud kiudu). Saadud tulemustest leiti aritmeetilised keskmised ja jaotus.

## 2.3. Villa puhtuse hindamine

Purustamata ja purustatud villa puhtuse visuaalseks hindamiseks kasutati optilist mikroskoopi ja SEM-i. SEM-i proovi ettevalmistuseks tõmmati purustamata ja purustatud villa kiud metallplaadi peal olevate süsinikteipide vahele ning kaeti 9 nm paksuse hõbedakihihiga.

Villa mustusesisalduse määramiseks kaaluti ligikaudu 1,1 grammised purustatud lambavilla proovid. Proovide täpsed massid kirjutati üles ning proovid tähistati vastavalt. Villa puhastamiseks töödeldi proove 50 ml pH 11 lahusega 45 minutit temperatuuril 50 °C. Pärast töötlust loputati kiud veega ning asetati Petri tassidele kuivama. Proovid kuivasid tõmbekapis kaks ööpäeva, pärast mida proovid kaaluti ning leiti nende massikadu. Lisaks leiti massikadu ainult veega loputamisel ilma eelnevalt kiude pesemata. Selliselt saadud massikadu vastab villavaha külge jäänud lisandite ja rasuhigi sisaldusele. Katsete kohta tehti kolm kordust, mille tulemustest leiti aritmeetiline keskmine ja standardhälve. Massikao leidmiseks kasutati valemit:

$$dm\% = \frac{m_{alg} - m_{lõpp}}{m_{alg}} \cdot 100\%.$$

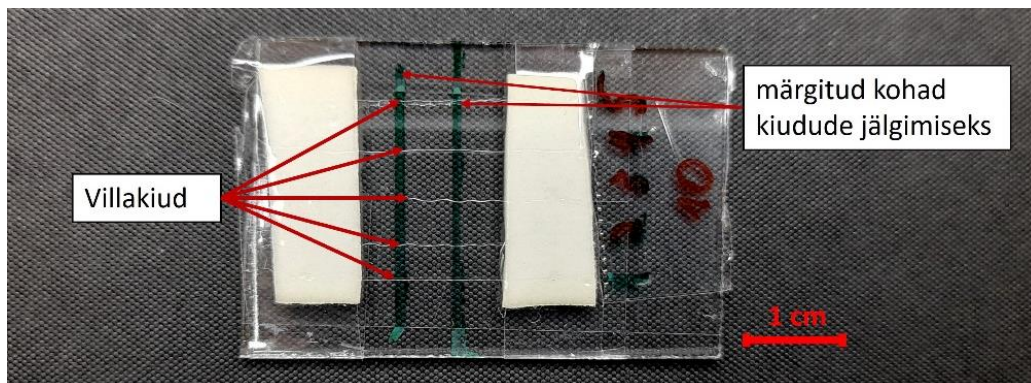
Villa puhastamisel tekkinud sadet (edaspidi lahustumatu lisand) uuriti visuaalselt SEM ja OM abil ning selle elemendiline koostis määrati SEM-EDX analüüsiga. Proovi ettevalmistamiseks filtreeriti villa töötlemisel tekkinud lahus ning filterpaberile jäänud jääk loputati töötluslahuse ja veega. Lahustumatu lisand kuivatati vaakumahjus ning kinnitati süsinikteibi abil SEM proovi alusele.

Purustamise mõju hindamiseks villavaha struktuurile eraldati purustamata ja kahe purustusastmega (lühike ja pikk) purustatud villast etoksüetaanis lahustuv osa. Tekkinud lahus valati Petri tassile ning lasti kuivada tõmbekapis.

## 2.4. Aluselise keskkonna mõju uurimine

Kuna tööstuslikes villapuhastusprotsessides kasutatakse aluselist keskkonda, siis uuriti erineva pH-ga lahuste mõju purustamata ja purustatud lambavillale. Kiude töödeldi 3 ml klaasviaalides toatemperatuuril pH 8, 10 ja 12 juures 10 ja 30 minutit. Pärast töötlust loputati kiud veega ning asetati Petri tassidele kuivama. Kõiki proove uuriti OM-ga ning salvestati mikrograafid iseloomulikest kohtadest.

Edasi uuriti villa puhastumist mikroskoobi all. Proovi ettevalmistamiseks asetati mikroskoobi alusklaasile kaks kahepoolse teibi riba (vahekaugusega umbes 1 cm), mille vahele kinnitati pesemata purustatud villa kiud. Alusklaasi tagumisele küljele märgiti markeriga kiududega ristuvad jooned, selleks, et hiljem mikroskoobi all oleks võimalik jälgida kiudu samadest kohtadest. Kahepoolsed teibid ja markeriga kirjutatu kaeti täiendavalt läbipaistva teibiga, et need töötamise käigus klaasi pealt maha ei tuleks (Joonis 4). Proov asetati Petri tassiga OM alla ning pH 13 lahus valati Petri tassi selliselt, et kõik kiud oleksid kaetud. Kiududest salvestati OM mikrograafid enne ja pärast töötlust ning töötamise ajal iga 10-ne minuti tagant kõigist märgitud kohtadest. Töötlus kestis 1 tund.



**Joonis 4.** Töötlemiseks valmis mikroskoobiproov

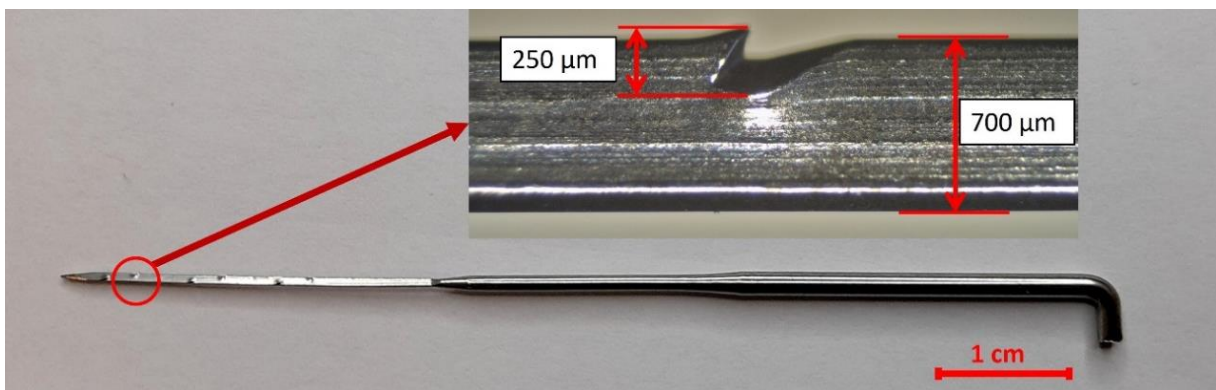
Temperatuuri mõju hindamiseks töödeldi eespool kirjeldatud viisil ettevalmistatud mikroskoobiproove 50 °C juures 10, 20 ja 30 minutit. Enne kiudude töötlemist viidi pH 13 lahus temperatuurile 50 °C. Katses kasutatud temperatuur valiti kirjanduses toodud väärtuste järgi [7,64]. Proove töödeldi temperatuurianduriga pliidil 10, 20 ja 30 minuti jooksul, iga töötlusaja jaoks oli erinev proov. Pärast vastava aja möödumist eemaldati proov lahusest ning kuivatati vedelik kiudude alt. Kõigist proovidest salvestati enne ja pärast töötlust OM mikrograafid, samuti määrati OM-ga kiu diameeter. Sama katset korrati pH 11 lahusega.

## 2.5. Korduva pesemise katse

Et hinnata, kui suurt kogust villa oleks võimalik sama lahusega efektiivselt puhastada töödeldi samas lahuses kümme proovi. Iga proovi jaoks kaaluti umbes 2,2 g vaakumahjus kuivatatud villa. Proovid nummerdati ning nende täpsed massid märgiti üles. Töötlemiseks kasutati pH 11 lahust algse ruumalaga 100 ml, mida hoiti kogu töötlemise ajal 50 °C juures. Iga proovi töödeldi lahuses 10 minutit. Pärast töötlust eemaldati proovist võimalikult palju lahust, et lahuse kadu töötlemisel oleks minimaalne. Kõik proovid kuivatati pärast töötlust vaakumahjus ning leiti nende massikadu.

## 2.6. Viltimistest

Viltimistesti peamine eesmärk oli hinnata, kas villa on võimalik nõelviltida, seejuures oli olulisem see, mis juhtub viltimise käigus nõelaga kui saadud vildi omadused. Villa viltimise võimalikkuse hindamiseks vilditi kindlat kogust proovi (0,6–1 g) käsitsi 10 minuti jooksul. Viltimiseks kasutati kolmnurkse ristlõikega viltimisnõela külje laiusega 700 µm ja kida sügavusega 250 µm (Joonis 5). Enne igat katset puhastati nõel etoksüetaaniga ultrahelivannis ning puhtust kontrolliti stereomikroskoobiga. Pärast viltimist vaadeldi nõela OM-ga ning salvestati mikrograafid olulisematest kohtadest. Vildi tiheduse määramiseks kaaluti saadud vildipall ning mõõdeti mikromeetriga selle läbimõõtu viie erineva koha pealt. Keskmise läbimõõdu järgi leiti palli ruumala kasutades kera ruumala valemit. Tulemuse kontrollimiseks tehti kolm korduskatset ning leiti nende keskmine ja standardhälve.



**Joonis 5.** Töös kasutatud viltimisnõel

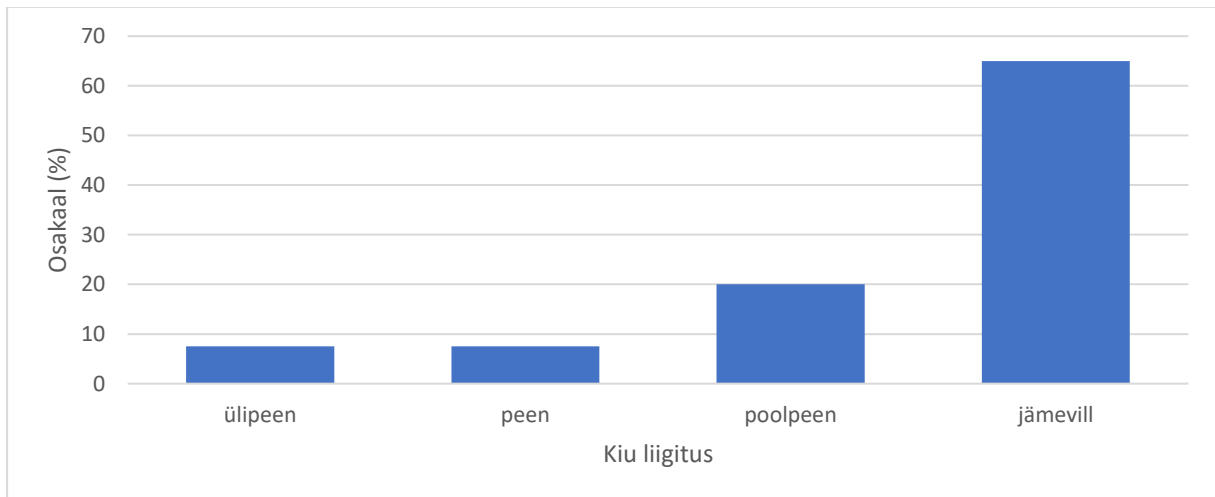
## 2.7. Auruga töötlemine

Kiudude töötlemiseks auruga kasutati käsi-aurukeskust pideva auruvooga 30 g/min. Pesemata purustatud villa töödeldi auruga 10 minuti jooksul. Muutust hinnati visuaalselt OM ja stereomikroskoobiga. Lisaks tehti aurutatud kiududele viltimistest.

### 3. Tulemused ja arutelu

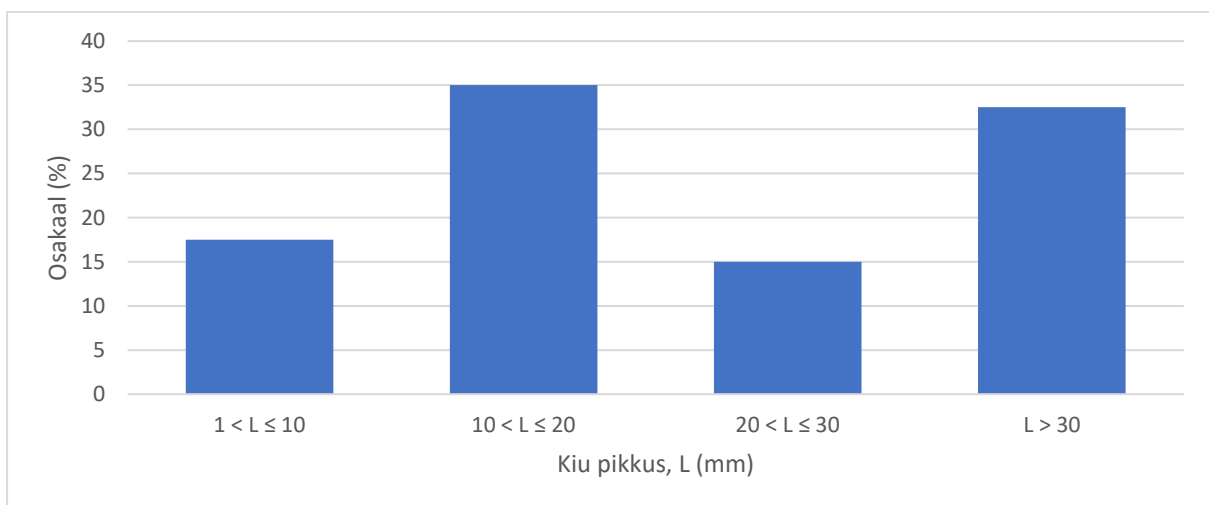
#### 3.1. Uuritud lambavilla karakteriseerimine

Töös uuritud lambavilla diameeter varieerus 15  $\mu\text{m}$  kuni 51  $\mu\text{m}$ . Seega on kokkuostust saadud villas nii ülipeeneta villa kui jämevilla. Jooniselt 6 on aga näha, et villast üle 60% moodustab jämevill kiu diameetriga üle 30  $\mu\text{m}$  ning ainult 15% on peen ja ülipeen vill.



**Joonis 6.** Töös uuritud lambavilla kiudude jaotus läbimõõdu järgi

Enne purustamist oli lambavilla kiudude keskmine pikkus 128 mm ning see varieerus vahemikus 52 mm kuni 168 mm. Purustamise käigus muutus villa kiupikkus ebahütlaseks (Joonis 7). Purustatud kiudude pikkus varieerus 1 mm kuni 66 mm. Lisaks oli purustatud villas kiude, mis olid joonlauaga mõõtmiseks liiga lühikesed. Nende pikkuseks määrati OM-ga 0,2–1,2 mm.

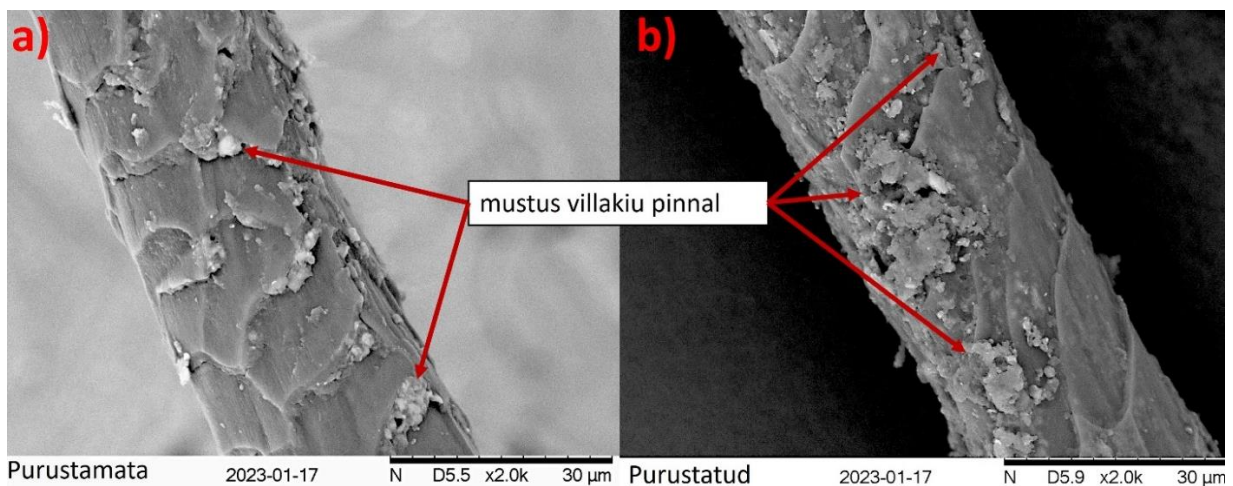


**Joonis 7.** Töös uuritud lambavilla kiudude jaotus pikkuse järgi

## 3.2. Villa puhtus

Purustatud lambavill oli visuaalselt mustem kui purustamata vill, kiu pinnal oli näha erineva suurusega lisandeid, mis purustatud villa korral olid kohati katnud ka soomuselise struktuuri (Joonis 8 **Error! Reference source not found.**). Purustatud villa mustusesisalduseks määrati  $39 \pm 1\%$  ning uuritud vill sisaldas 13% villavaha. Need tulemused on heas kooskõlas kirjanduses toodud andmetega [7]. OM vaatluse käigus tuvastati villas taimede osi ning villavaha külge jäänud väikseid kive.

EDX analüüs lahustumatust lisandist näitas suurt süsiniku, hapniku, räni ning väikest kaaliumi, alumiiniumi ja kaltsiumisisaldust. Suur süsinikusisaldus on seotud orgaanilise materjaliga ning vähesel määral proovi ettevalmistamiseks kasutatud süsinikeibiga. Hapnik ja räni on pärit silikaatidest, mis on mulla mineraalse osa koostises. Kaaliumi, alumiiniumi ja kaltsiumisisaldus lahustumatus jäägis on seotud mineraalsete lisanditega mullas. Lisaks tuvastati OM-ga lahustumatust jäägist purustamisel tekkinud alla millimeetrise pikkusega kiujuppe.



**Joonis 8.** SEM mikograafid a) purustamata ja b) purustatud villast

### 3.2.1. Purustamise mõju villavahale

Purustatud vill oli enne puhastamist värvuselt tumedam kui purustamata vill. Kuna värvuste erinevus puhastamise käigus vähenes, siis eeldati, et värvuse muutus on tingitud villas olevate lisandite koostise muutusest (Joonis 9).



**Joonis 9.** Purustatud (pikk) vill a) enne ja b) pärast pesemist ning purustamata vill c) enne ja d) pärast pesemist

Villavaha struktuuri muutuse kontrollimiseks mõõdeti infrapunasppektrid (IP-spektrid) kahe pikkusega purustatud villast (lühike ja pikk) ning purustamata villast eraldatud villavahast (Joonis 10). Kuna kirjanduses on toodud vaid puhastatud lanoliini IP-spektrid ja puhastamata villavaha selliselt uuritud ei ole, siis oli spektrite tõlgendamine keeruline.

Proovidele mõõdetud kordusspektrid näitasid, et eraldatud materjal ei olnud homogeenne ning neeldumismaksimumide intensiivsused varieerusid oluliselt ka sama proovi korral. Selle põhjuseks võib olla tööstuslik purustamisprotsess, mille mõju villale ei ole ühtlane. Samas leidis spektrites ka neeldumismaksimume, mille intensiivsuse muutust sai seostada purustamisega.

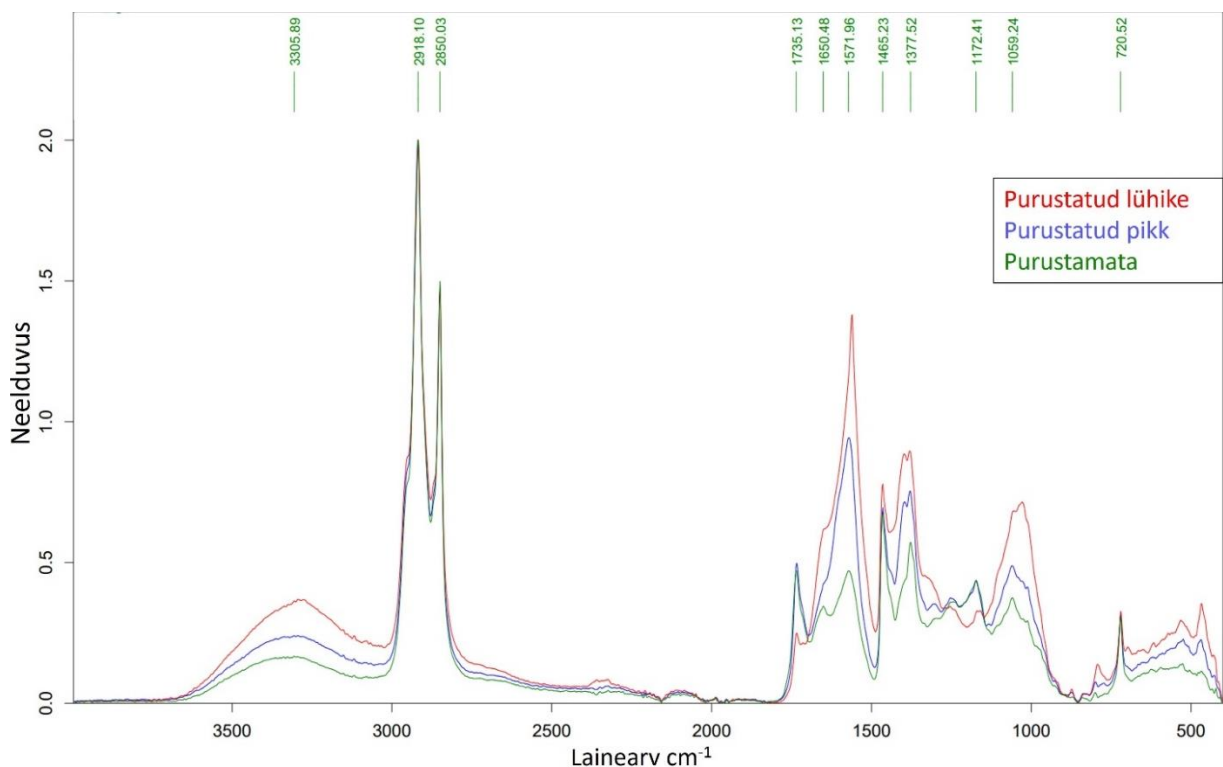
Lai neeldumismaksimum  $3306\text{ cm}^{-1}$  vastab O–H sideme valentsvõnkumisele, mis võib näidata vee ja alkoholi sisaldust villavahas. Kõigis uuritud spektrites olid vahale iseloomulikud neeldumismaksimumid, mis kinnitavad lanoliini sisaldumist proovides. Tugevad neeldumismaksimumid  $2918\text{ cm}^{-1}$  ja  $2850\text{ cm}^{-1}$  juures vastavad  $\text{CH}_2$  rühma asümmeetrilisele ja sümmeetrilisele valentsvõnkumisele, mis näitab pikkade süsivesinikahelate olemasolu proovis. Seda kinnitavad täiendavalt neeldumismaksimumid  $1465\text{ cm}^{-1}$  ja  $720\text{ cm}^{-1}$  juures, mis vastavad  $\text{CH}_2$  rühma deformatsioonvõnkumistele. Süsivesinikahelate sisaldumist proovis kinnitab lisaks  $\text{CH}_3$  deformatsioonvõnkumisele vastav neeldumismaksimum ( $1378\text{ cm}^{-1}$ ). Neeldumine nendel lainearvudel ei ole muutunud (välja arvatud  $1378\text{ cm}^{-1}$ ), seega ei mõjuta purustamine süsivesinikahelaid. [92]

Väike neeldumismaksimum  $1650\text{ cm}^{-1}$  juures purustamata villalt eraldatud villavaha spektris vastab C=C sidemele (cis-isomeer) ning näitab küllastamatust süsivesinikahelas. Purustatud villade villavaha spektris on kaksiksidemele vastav neeldumismaksimum teise varjus ning intensiivsuse muutust eristada ei ole võimalik. [92]

Estrite sisaldumist proovis kinnitavad estri C=O valentsvõnkumisele ( $1735\text{ cm}^{-1}$ ) ja C–O valentsvõnkumisele ( $1172\text{ cm}^{-1}$ ) vastavad neeldumismaksimumid. Estrile iseloomulike neeldumiste vähenemine spektris võib tulla estrite lagunemisest purustamise käigus.

Pärast purustamist on suurenenud primaarsele alkoholile vastava C–O sideme valentsvõnkumise neeldumismaksimum ( $1060\text{ cm}^{-1}$ ). Seega võib eeldada estri hüdrolüüsiumist temperatuuri ja villas sisalduva niiskuse mõjul alkoholiks ja karboksüülhappeks. Spektrites puudub happe karbonüülrühmale vastav neeldumismaksimum, seega on vabade hapete sisaldumine proovis vähetõenäoline. Purustamise käigus muutuvad intensiivsemaks ka neeldumismaksimumid  $1572\text{ cm}^{-1}$  ja  $1378\text{ cm}^{-1}$  juures. Need võivad vastata karboksülaatiooni C–O asümmeetrilisele ja sümmeetrilisele valentsvõnkumisele.  $1378\text{ cm}^{-1}$  juures on endiselt ka  $\text{CH}_3$  rühma deformatsioonvõnkumine, kuid intensiivsuse suurenemine on seotud karboksülaatioonile vastavate võnkumistega. Seega on estri lagunemisel tekkinud karboksüülhappe proovis ioonsel kujul, tõenäoliselt kaaliumisoolana. [33,34,92]

Purustamise käigus toimuvate keemiliste muutuste täpsemaks kirjeldamiseks tuleks täiendavalt uurida proovi koostist ning viia purustamine läbi kontrollitud laboritingimustes.

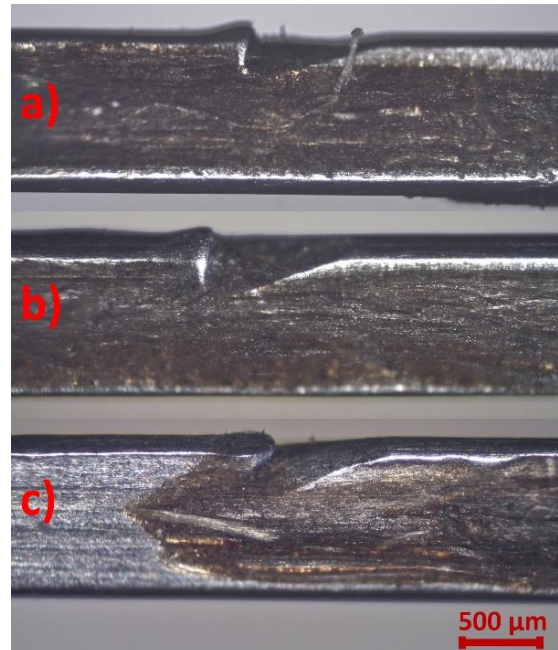


**Joonis 10.** Purustamata villast (roheline) ja kahe pikkusega purustatud villast – lühike (punane) ja pikk (sinine) – eraldatud villavaha IP-spektrid

### 3.3. Villa töötlemine

#### 3.3.1. Pesemata villa viltimine

Villa viltimise võimalikkuse hindamiseks prooviti viltida pesemata purustamata ja purustatud villa. Purustamata villast saadi vildipall tihedusega  $0,27 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$  ja purustatud villast  $0,22 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$  (Joonis L1). Purustamata villast vildi suurema tiheduse põhjuseks on pikemate kiudude parem viltumine. Puhta villa viltimisel saadi tiheduseks  $0,24 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$ . Seega ei takista lambavilla suur mustusesisaldus sellest vildi moodustamist ning pesemata purustamata villast vildi tihedus oli suurem kui pestud villast. Pesemata villast vildi suurema tiheduse põhjuseks võib olla villavaha, mis aitab täiendavalt kiude siduda.



**Joonis 11.** Viltimisnõel pärast a) purustatud, b) purustamata ja c) loputatud villa viltimist

Viltimisnõelte vaatlus OM-ga näitas, et nõela külgedel oli villavaha kiht ning viltimiseks olulised kidad olid ummistunud (Joonis 11.a ja 11.b). Nõel määrdus ka lihtsalt veega loputatud purustatud villa viltimisel (Joonis 11.c), seega ei ole ka lihtsalt lahustumatu lisandi maha loputamine piisav. Pesemata lambavilla viltimist piiravaks teguriks nõela määrdumine ning kidade ummistumine villavahaga.

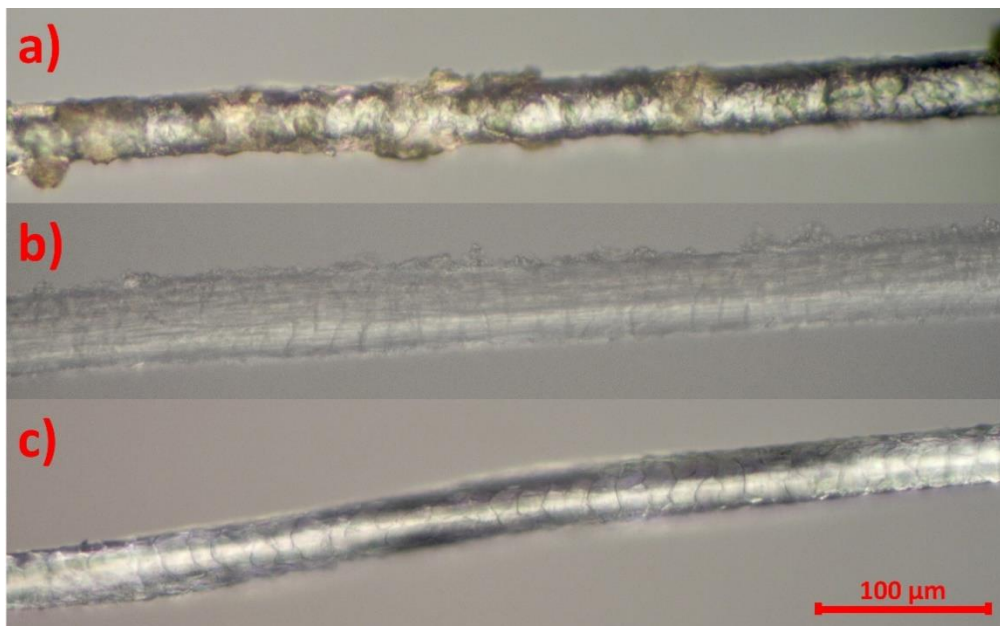
#### 3.3.2. Aluseline töötlus

Edasi uuriti võimalusi villa puhastamiseks aluselises keskkonnas toatemperatuuril. Purustamata vill oli visuaalselt puhas juba pH 8 juures 10-minutilise töötusega. Pikemal töötlemisel ning aluselisel keskkonnal kiududele mõju ei olnud. Purustatud villakiud olid mustad veel ka pärast 30-minutist töötust pH 12 juures (Joonis 12). Villavaha keemilise koostise muutumise tõttu oli purustatud villa puhastamine raskem ning puhastamiseks oli vaja tugevamat töötust. Kuna viltimisele eelnevas võrgu laotamise etapis tuleb kasutada purustatud villa ning selle puhastamine on keerulisem, siis uuriti edasi vaid purustatud villa töötlemise võimalusi.



**Joonis 12.** OM mikrograafid a) purustatud villast enne töötlust, b) pH 12, 30 min töödeldud purustatud villast ja c) pH 8, 10 min töödeldud purustamata villast

Purustatud villa puhastumise edasiseks uurimiseks suurendati lahuse pH-d ning pikendati töötusaega. Joonisel 13 on toodud ühe kiu OM mikrograaf enne töötlust, töötamise ajal ja peale töötlust. Kõik OM all uuritud villakiud olid enne töötlust nähtavalt mustad ning kiu soomusjat struktuuri näha ei olnud (Joonis 13.a). Samuti paistis kiu peal suuremaid mustuse tükke. Pärast 10-minutilist töötlust oli lahuses olevatest kiududest kahel näha soomusjat struktuuri, kuid kiudude peal oli endiselt näha ka mustust. Joonisel 13**Joonis 13.b** on näha kiud pärast 50-minutilist töötlust. Kiu peal paistab soomuseline struktuur, kuid servades on endiselt näha mustust. Mikrograafi madalam kontrast on põhjustatud sellest, et kiud oli vaatluse hetkel töötuslahusega kaetud. Pärast töötlust, kui lahus oli ära valatud ning kiudude alt vedelik ära kuivatatud, olid aga kiud puhtad ning kõigis jälgitud kohtades oli hästi näha ka kiu soomuseline struktuur (Joonis 13.c). Seega on villa puhastamiseks vaja lisaks aluselisele keskkonnale ka vedeliku liikumist. Töötamise käigus kiudude läbimõõtudes muutusi ei täheldatud.



**Joonis 13.** OM mikrograafid purustatud villast a) enne töötlust, b) töötluse ajal ja c) pärast töötlust

### 3.3.3. Temperatuuri mõju töötlusele

Puhastamise kiirendamiseks uuriti temperatuuri mõju töötlusele. Villa töötlemisel 50 °C juures pH 13 lahuses olid kiud puhtad juba 10 minutiga. Pikem töötlus nendel tingimustel kahjustas kiudu ning kutiikula alt hakkas välja paistma kiu järgmine struktuur – korteks. Selleks, et valmistada lambavillast piisavalt pikaeline geotekstiil, tuleb aga villa pealmist struktuuri võimalikult vähe kahjustada, sest korteks on biolagunemisele vastuvõtlikum [35].

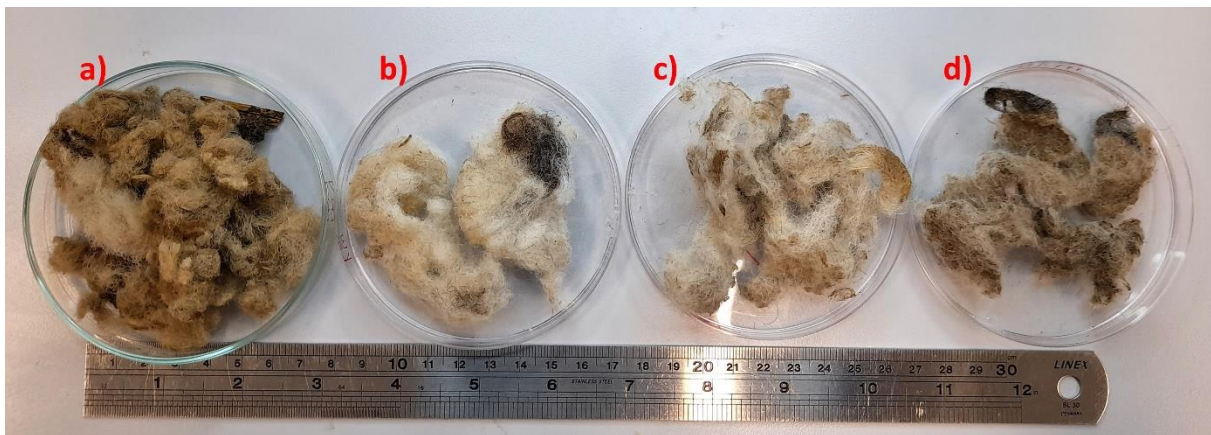
pH 11 lahusega töödeldes olid kiud visuaalselt puhtad 10 minutiga ning pikema töötluse juures kiudude kahjustumist ei märganud. Kiudude puhtust kinnitas ka viltimistest – peale töödeldud villa viltimist oli nõela kidade põhjas vaid veidi mustust. Seega on pH 11 sobilik keskkond villa puhastamiseks tõstetud temperatuuril.

### 3.3.4. Töötluslahuse korduv kasutamine

Kuna eelnevates katsetes oli töötluslahuse kogus villa kogusega võrreldes suur (villa ja lahuse suhe 11 : 500), siis uuriti edasi võimalusi vähendada villa puhastamiseks kuluvat vee kogust. Kasutades eelnevalt leitud optimaalsemaid töötlemistingimusi (50 °C, pH 11 ja 10 min) töödeldi ühe lahusega järjest mitut proovi. Visuaalselt vähenes villa puhtus iga töödeldud prooviga. Juba kasutatud lahuses töödeldud vill olid pärast töötlust tumedamad kui puhtas lahuses töödeldud (Joonis 14). Puhastumise halvenemist kinnitas ka proovide kohta arvatud massikadu, mis vähenes töödeldud proovide arvu kasvuga. Lahuse puhastusvõime vähenemine võis tulla lahuse saastumisest, samuti oli põhjuseks ka lahuse ruumala vähenemine. Kuna

proovid olid eelnevalt kuivatatud, siis võisid need töötuse käigus endaga siduda kuni 35% lahust võrreldes proovi esialgse massiga. OM-vaatlus ning viltimistest näitasid, et sama lahusega on võimalik puhastada kuni 3 proovi. Seega väheneks lahuse kulu 1 kg villa puhastamiseks 45 liitrit 15-ne liitrini.

Lahuse puhastusvõimet oleks võimalik tööstuste vahepeal suurendada näiteks selle koaguleerimisel ja filtreerimisel. Helvestusainete kasutamist villa puhastamisprotsessis on uurinud näiteks Wang jt (2022), kes kasutasid helvestusainetega töödeldud pesuvett korduvalt villa puhastamiseks ning viisid sellega puhta vee kulu 2,5 liitrini kilogrammi villa kohta. Villa puhastamiseks kasutati neutraalset pesuainet. [65]



**Joonis 14.** Purustatud vill töödeldud samas lahuses võrdluses töötlemata villaga, a) töötlemata vill, b) esimene proov, c) kuues proov, d) kümnes proov

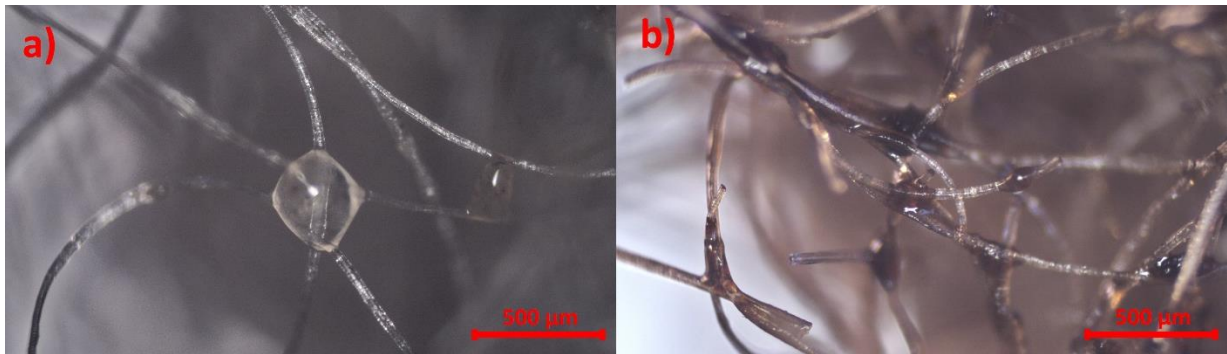
### 3.3.5. Villa töötlemine neutraalses keskkonnas

Täiendavalt prooviti villa töödelda 50 °C juures ka neutraalses keskkonnas veega. OM-ga oli villa peal kohati näha veel mustust, kuid viltimistestil selgus, et ka neutraalses keskkonnas töödeldud villa on võimalik viltida ning nõel jääb seejuures puhtaks. Seega on võimalik villa eeltöötlus nõelviltimiseks ka ilma täiendavate kemikaalide ja pesuainete kasutamiseta. Villa puhastumine ilma täiendavate kemikaalideta on seletatav sellega, et lanoliin moodustab veega stabiilse emulsiooni ning temperatuuri tõstmine üle lanoliini sulamistemperatuuri kiirendab seda protsessi.

Villa puhastamine neutraalses keskkonnas loob võimaluse uue ning keskkonnasõbralikuma puhastusprotsessi väljatöötamiseks. Küll aga ei lahenda pesuainetest loobumine heitveega kaasnevat keskkonnaprobleemi. Samuti oleks geotekstiili valmistamisel kasulik, kui villavaha jääks kiu külge, sest sellega kaasneksid täiendavad toitained taimedele. Lisaks võiks villavaha pikendada ka geotekstiili eluiga, sest tekitab kiu pinnale hüdrofoobse keskkonna.

### 3.3.6. Auruga töötlemine

Villa puhastamiseks kuluva veekoguse vähendamiseks uuriti auru kasutamise võimalusi villa töötlemisel. Veeaur võimaldaks tekitada niiske keskkonna ning samuti tõsta villa temperatuuri üle lanoliini sulamistemperatuuri. Auruga töödeldud villa uurimisel OM-ga selgus, et töötamise mõjul tekkisid kiudude kokkupuutekohtadesse villavaha ja vee tilgad, millest vee aurustumisel jäi järgi vaid villavaha (Joonis 15).



**Joonis 15.** OM mikrograafid lambavillast pärast auruga töötlemist a) märjalt ja b) kuivalt  
Villa vilditi vahetult pärast auruga töötlemist, soojalt, ning pärast kuivamist toatemperatuuril. Sooja ja niiske villa viltimisel saadi tihedam ( $\rho = 0,28 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ) vilt, kui kuiva villa viltimisel ( $\rho = 0,23 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ ). Selle põhjuseks võib olla sooja ja niiske villa väiksem elastsusmoodul, mis parandab kiudude viltumist. Samuti võib vildi omadusi parandada kiudude külge jääv villavaha, mis peale jahtumist uuesti tahkub ja kiude täiendavalt omavahel seob. See protsess on võrreldav tööstuses kasutatava termilise võrgu sidumisega, kus sidumine toimub termoplastsete polümeeride abil. Viltimisnõel oli pärast sooja villa viltimist aga villavahaga kaetud ning kidad ummistunud. Kuiva villa korral olid nõela küljed puhtad, kuid kidad olid siiski mustust täis.

Aurukeskkonnas viltimiseks tuleb käesolevas töös kasutatud viltimistesti muuta. Esimesed katsetused villa aurukeskkonnas viltida näitasid aga, et kui viltimisnõel töötab veeaurus, siis see ei määrdunud villavahaga ning viltimiseks olulised kidad jäävad puhtaks.

Kuna ka taimsete kiudude elastsusmoodul väheneb niiskes keskkonnas, siis võiks auruga töötlemisel paraneda ka taimsete kiudude viltumine. Lisaks võib eeldada, et kui viltida aurukeskkonnas koos pesemata villa ja taimseid kiude, siis suudab villavaha asendada praegu jääkade ja habraste taimsete kiudude töötlemiseks kasutatavaid mineraalseid õlisid. Samuti võib sula lanoliiniga „määrimine“ vähendada ka nõelte kulumist, milleks tööstuslikes protsessides kasutatakse samuti mineraalseid õlisid. Lisaks võiks villast ja taimsetest kiududest segavildi omadusi parandada villavaha, kui see jahtudes uuesti tahkub.

Auruga töödeldud taimsete kiudude viltumist kontrolliti katseliselt ning saadi positiivsed tulemused, seega väärub teema edasist uurimist. Kuna tulemused ei seostu töö alguses püstitatud eesmärgiga, siis neid lähemalt ei käsitleta.

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames uuriti võimalusi looduslikest kiujäätmetest geotekstiili valmistamiseks. Kuna üle 90% Eestis ning umbes pool kogu maailmas toodetavast lambavillast läheb hävitamisele, siis keskenduti töös pesemata lambavillale lisandväärtuse andmise ning kasutamisevõimaluste uurimisele. Töö käigus karakteriseeriti kasutatud lambavill ning uuriti selle lisandite koostist SEM-EDX analüüsi ja IP-spektroskoopiaga. Lisaks uuriti erinevaid väikse ökoloogilise jalajäljega villa puhastamise võimalusi. Töös kasutati puhtuse hindamiseks optilist mikroskoopi ja viltimistesti.

Töös kasutatud purustatud ja purustamata villa puhastamise uurimisel selgus, et purustamise käigus muutub villavaha keemiline koostis ja see raskendab villa puhastamist ning seetõttu keskenduti töös purustatud villa uurimisele. Purustatud vill sisaldas 39% lisandeid, millest üle 60% sisaldas villavaha külge kleepunud orgaaniline ja mineraalne materjal ning vees lahustuv osa. Nõelviltimist takistavaks osutus aga villa peal olev villavaha, mis kleepus nõela külge ning ummistas viltimiseks olulised kidad. Leiti, et temperatuuri tõstmine 50 °C kiirendab villa puhastamisprotsessi ning võimaldab villa nõelviltimiseks piisava puhtuse saavutada ka pesuaineid ning aluselist keskkonda kasutamata.

Puhastusprotsessis veekulu vähendamiseks uuriti võimalusi kasutada veeauru. Auruga töödeldud villa viltimisel nõel küll määrdus, aga kui viltimine toimus auruga töötlemise ajal, siis jäi nõel puhtaks. Samuti olid saadud vildi omadused paremad kui puhastatud villa viltimisel. Maailmas kasutatakse olulisel määral ka taimseid kiude, mille praegused töötlemismeetodid sisaldavad erinevaid mineraalseid õlisid. Auru kasutamine kiudude eeltöötlusena võiks anda positiivseid tulemusi ka taimsete kiudude viltimisel. Samuti võiks lambavilla ja taimsete kiudude koosviltimise korral asendada villavaha praegu taimsete kiudude viltimiseks kasutusel olevaid mineraalseid õlisid. Edasise töö käigus tuleks keskenduda taimsete kiudude ja lambavilla koosviltimise võimaluste uurimisele. Lisaks on oluline hinnata saadud materjali mehaanilisi omadusi, eluiga ning biolagunevust.

## Kasutatud kirjandus

1. C. Fetting, "The European Green Deal," ESDN Office, Vienna (2020).
2. European Commission, "A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe," (2020).
3. European Commission, "The 3 Billion Trees Pledge," [https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030/3-billion-trees\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030/3-billion-trees_en).
4. IWTO, *Market Information*, ED. 17 (2022).
5. A. Matsin, K. Tali, K. Kabun, and L. Kool, "Ülevaade Eesti villamajandusest 2022 / Estonian wool industry: the current state," *Studia Vernacula* **14**, 206–223 (2022).
6. V. D. Zheljaskov, G. W. Stratton, J. Pincock, S. Butler, E. A. Jeliaskova, N. K. Nedkov, and P. D. Gerard, "Wool-waste as organic nutrient source for container-grown plants," *Waste Management* **29**, 2160–2164 (2009).
7. F. O. Howitt and R. Preston, "61—THE COMPOSITION OF SUINT," *Journal of the Textile Institute Transactions* **51**, T841–T856 (1960).
8. E. R. Trotman, *Textile Scouring and Bleaching* (Griffin, 1968).
9. H. M. Ang and F. Himawan, "Treatment of wool scouring wastewater for grease removal," *Journal of Hazardous Materials* **37**, 117–126 (1994).
10. Statista Research Department, "Global production volume of textile fibers 1975-2021," <https://www.statista.com/statistics/263154/worldwide-production-volume-of-textile-fibers-since-1975/>.
11. P. Methacanon, U. Weerawatsophon, N. Sumransin, C. Prahsarn, and D. T. Bergado, "Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles," *Carbohydrate Polymers* **82**, 1090–1096 (2010).
12. M. John and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites," *Carbohydrate Polymers* **71**, 343–364 (2008).
13. H. Lilholt and J. M. Lawther, "Natural Organic Fibers," in *Comprehensive Composite Materials* (Elsevier, 2000), pp. 303–325.
14. T. P. Nevell and S. H. Zeronian, eds., *Cellulose Chemistry and Its Applications*, Ellis Horwood Series in Chemical Science (E. Horwood ; Halsted Press, 1985).
15. X. Liu, J. Wang, S. Li, X. Zhuang, Y. Xu, C. Wang, and F. Chu, "Preparation and properties of UV-absorbent lignin graft copolymer films from lignocellulosic butanol residue," *Industrial Crops and Products* **52**, 633–641 (2014).
16. M. Prambauer, C. Wendeler, J. Weitzenböck, and C. Burgstaller, "Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials," *Geotextiles and Geomembranes* **47**, 48–59 (2019).
17. M.-J. Le Guen, R. H. Newman, A. Fernyhough, S. J. Hill, and M. P. Staiger, "Correlations Between the Physiochemical Characteristics of Plant Fibres and Their Mechanical Properties," in *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*, R. Fanguero and S. Rana, eds., RILEM Bookseries (Springer Netherlands, 2016), Vol. 12, pp. 35–47.
18. H. Miyake, Y. Gotoh, Y. Ohkoshi, and M. Nagura, "Tensile Properties of Wet Cellulose," *Polym J* **32**, 29–32 (2000).
19. P. Saha, S. Manna, S. R. Chowdhury, R. Sen, D. Roy, and B. Adhikari, "Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment," *Bioresource Technology* **101**, 3182–3187 (2010).
20. *Chemical Composition of Jute (Corchorus Capsularis) Fibers Used for Paper Pulp Manufacturing* (2009).

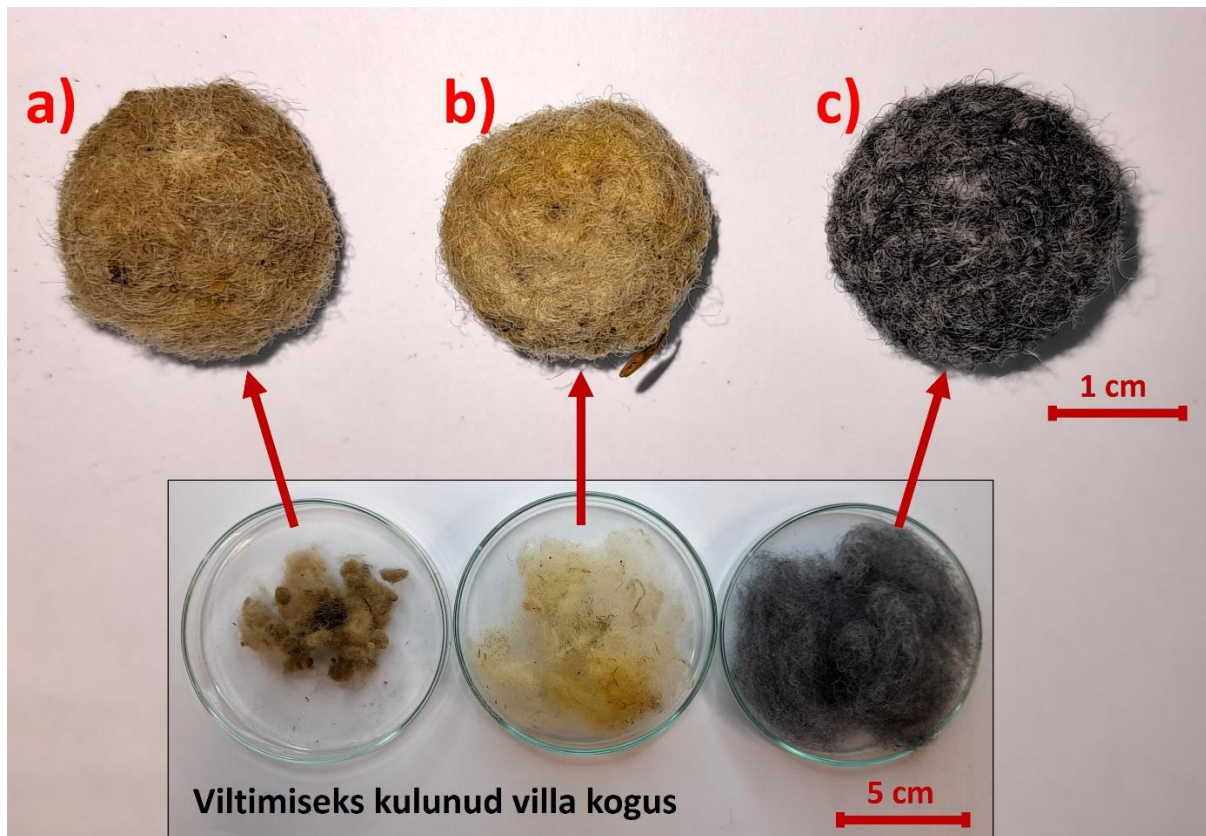
21. J. C. Del Río, J. Rencoret, G. Marques, J. Li, G. Gellerstedt, J. Jiménez-Barbero, Á. T. Martínez, and A. Gutiérrez, "Structural Characterization of the Lignin from Jute (*Corchorus capsularis*) Fibers," *J. Agric. Food Chem.* **57**, 10271–10281 (2009).
22. M. Zimmiewska, W. Rozańska, A. Gryszczynska, B. Romanowska, and A. Kicinska-Jakubowska, "Antioxidant Potential of Hemp and Flax Fibers Depending on Their Chemical Composition," *Molecules* **23**, 1993 (2018).
23. D. Lebedeva, S. Hijmans, A. P. Mathew, E. Subbotina, and J. S. M. Samec, "Waste-to-Fuel Approach: Valorization of Lignin from Coconut Coir Pith," *ACS Agric. Sci. Technol.* **2**, 349–358 (2022).
24. K. Mccune, "Best Breeds Of Sheep For Wool (Fine, Medium, Long and Specialty)," *Family Farm Livestock* (2022).
25. H. Rajabinejad, I.-I. Buciscanu, and S. Maier, "Current Approaches For Raw Wool Waste Management And Unconventional Valorization: A Review," *Environmental engineering and management journal* **18**, (2018).
26. M. Lewin, ed., *Handbook of Fiber Chemistry*, 3rd ed, International Fiber Science and Technology Series No. 16 (CRC/Taylor & Francis, 2007).
27. N. A. G. Johnson, E. J. Wood, P. E. Ingham, S. J. McNeil, and I. D. McFarlane, "Wool as a Technical Fibre," *Journal of the Textile Institute* **94**, 26–41 (2003).
28. M. Feughelman, *Mechanical Properties and Structure of Alpha-Keratin Fibres: Wool, Human Hair and Related Fibres* (UNSW Press, 1997).
29. C. Deng, L. Wang, and X. Wang, "The limiting irregularity of single wool fibers," *Fibers Polym* **10**, 246–251 (2009).
30. I. C. Watt and R. L. D'Arcy, "26—WATER-VAPOUR ADSORPTION ISOTHERMS OF WOOL," *The Journal of The Textile Institute* **70**, 298–307 (1979).
31. CISRO Science Image, "CSIRO Science Image - The structure of a Merino Wool Fibre," <https://www.scienceimage.csiro.au/image/7663/the-structure-of-a-merino-wool-fibre/>.
32. National Center for Biotechnology Information, "Lanolin - PubChem," <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Lanolin>.
33. M. C. M. Parlato and S. M. C. Porto, "Organized Framework of Main Possible Applications of Sheep Wool Fibers in Building Components," *Sustainability* **12**, 761 (2020).
34. A. Asperger, W. Engewald, and G. Fabian, "Analytical characterization of natural waxes employing pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **50**, 103–115 (1999).
35. J. Broda, "Biodegradation of Sheep Wool Geotextiles Designed for Erosion Control," in *Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches* (IntechOpen, 2019).
36. J. Broda, S. Przybyło, K. Kobiela-Mendrek, D. Biniś, M. Rom, J. Grzybowska-Pietras, and R. Laszczak, "Biodegradation of sheep wool geotextiles," *International Biodeterioration & Biodegradation* **115**, 31–38 (2016).
37. M. Hassan and C. Carr, "A review of the sustainable methods in imparting shrink resistance to wool fabrics," *Journal of Advanced Research* **18**, (2019).
38. International Organization for Standardization, "Nonwovens — Vocabulary," (2019).
39. N. Board, *The Complete Technology Book On Textile Spinning, Weaving, Finishing And Printing* (National Institute Of Industrial Re, 2009).
40. A. Pourmohammadi, "Nonwoven materials and joining techniques," in *Joining Textiles* (Elsevier, 2013), pp. 565–581.
41. T. V. CHAIN, "Overview of Nonwovens Bonding Technologies," *Textile Magazine, Textile News, Apparel News, Fashion News* (2015).
42. N. Reddy and Y. Yang, "Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications," *Trends in Biotechnology* **23**, 22–27 (2005).

43. A. N. Desai and R. Kant, "Geotextiles made from natural fibres," in *Geotextiles* (Elsevier, 2016), pp. 61–87.
44. M. Ramesh, "Hemp, jute, banana, kenaf, ramie, sisal fibers," in *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres* (Elsevier, 2018), pp. 301–325.
45. M. Lewin, M. Shiloh, and J. Banbaji, "The Crimp of Alkali Treated Jute Fibers," *Textile Research Journal* **29**, 373–385 (1959).
46. P. K. Ray, B. K. Das, S. K. Banerjee, and S. K. Sen, "On the partial mercerization and crimp development in jute fiber," *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition* **21**, 263–270 (1983).
47. TextileBlog, "Nonwoven Fabric Manufacturing Techniques," *Textile Blog* (2020).
48. R. Mia, M. Islam, B. Ahmed, and J. Mojumdar, "Woolenization of Jute Fibre," *European Scientific Journal* **13**, (2017).
49. W. S. Simpson, G. H. Crawshaw, and Textile Institute (Manchester, England), eds., *Wool: Science and Technology*, Woodhead Publishing Limited Series on Fibres (CRC Press ; Woodhead, 2002).
50. H. Wang, S. Couture, and J. Bédard, "Watersaving Cleaning Processing of Sheep Wool and Eco-friendly Extraction of Lanolin," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **1048**, 012004 (2022).
51. European Commission, "Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast)," (2022).
52. D. V. Chapman, ed., *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 2. ed (E & FN Spon, 1996).
53. F. A. Salem Allafi, M. S. Hossain, M. O. Ab Kadir, M. A. Hakim Shaah, J. Lalung, and M. I. Ahmad, "Waterless processing of sheep wool fiber in textile industry with supercritical CO<sub>2</sub>: Potential and challenges," *Journal of Cleaner Production* **285**, 124819 (2021).
54. R. Elise, ed., *Nonwoven Fabric: Manufacturing and Applications*, Materials Science and Technologies (Nova Science Publishers, Inc, 2020).
55. A. K. Van der Vegt and G. J. Schuringa, "The Relation between Wool Felting and Single-Fiber Properties," *Textile Research Journal* **26**, 9–16 (1956).
56. A. B. Price, *Knitspeak: An A to Z Guide to the Language of Knitting Patterns* (Open Road Media, 2011).
57. B. W. English, "Geotextiles : a specific application of biofibers," *Research in industrial application of non-food crops. I, Plant fibres: proceedings of a seminar, May 1995, Copenhagen, Denmark. Lyngby, Denmark : Academy of Technical Sciences, [1995?].:p. [79]-86.* (1995).
58. G. Blankenburg, "12—THE FELTABILITY OF WOOL-MAN-MADE-FIBRE BLENDS AND THE INTERPRETATION OF THE FELTING MECHANISM," *Journal of the Textile Institute Transactions* **56**, T145–T155 (1965).
59. K. Chawla, *Fibrous Materials* (Cambridge University Press, 2016).
60. A. K. Sengupta, A. K. Sinha, and C. R. Debnath, "Needle-Punched Non-Woven Jute Floor Coverings: Part II-Dynamic Loading Behaviour and Abrasion Resistance.," (n.d.).
61. S. Debnath and M. Madhusoothanan, "Compression Properties of Polyester Needle-punched Fabric," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* **4**, 155892500900400420 (2009).
62. International Organization for Standardization, "Geosynthetics — Part 1: Terms and definitions," (2015).
63. R. M. Koerner, *Designing with Geosynthetics*, 5th ed (Pearson Prentice Hall, 2005).
64. C. W. Hsieh, "Geotextiles in agriculture and aquaculture," in *Geotextiles* (Elsevier, 2016), pp. 511–530.

65. R. W. Sarsby, "Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay," *Geotextiles and Geomembranes* **25**, 302–310 (2007).
66. J. Álvarez-Mozos, E. Abad, M. Goñi, R. Giménez, M. A. Campo, J. Díez, J. Casalí, M. Arive, and I. Diego, "Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 2: Influence on the establishment and growth of vegetation," *CATENA* **121**, 195–203 (2014).
67. B. Jankauskas, G. Jankauskienė, M. A. Fullen, and C. A. Booth, "The Effects of Biogeotextiles on the Stabilization of Roadside Slopes in Lithuania," *Balt. J. Road Bridge E.* **3**, 175–180 (2008).
68. *Geotextiles Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Natural, Synthetic), Product (Woven, Non-Woven), By Application (Erosion Control, Reinforcement), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030* (Grand View Research, Inc., 2023).
69. Dr. Sr. M. Gilda, Dr. V. Subramaniam, and Holy Cross Home Science College, Thoothukudi, "Preparation of Nonwoven Fabrics using Natural Fibers by Needle Punching Technology," *IJTSRD Volume-1*, 754–760 (2017).
70. S. John H. Greenwood, *Durability Of Geosynthetics, 2Nd Edition* (CRC Press, 2015).
71. M. Ghosh and P. Choudhury, "Suitability of Natural Fibres in Geotextile Applications," *IGC Geotextiles* 497–501 (2009).
72. A. R. Marques, P. Santiago De Oliveira Patrício, F. Soares Dos Santos, M. L. Monteiro, D. De Carvalho Urashima, and C. De Souza Rodrigues, "Effects of the climatic conditions of the southeastern Brazil on degradation the fibers of coir-geotextile: Evaluation of mechanical and structural properties," *Geotextiles and Geomembranes* **42**, 76–82 (2014).
73. R. M. Koerner, Y. G. Hsuan, and G. R. Koerner, "Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes," *Geosynthetics International* **24**, 198–212 (2017).
74. International Organization for Standardization, "Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 1: General guidance," (2016).
75. International Organization for Standardization, "Plastics — Instrumental determination of radiant exposure in weathering tests — General guidance and basic test method," (2017).
76. C. Badji, J. Beigbeder, H. Garay, A. Bergeret, J.-C. Bénézet, and V. Desauziers, "Correlation between artificial and natural weathering of hemp fibers reinforced polypropylene biocomposites," *Polymer Degradation and Stability* **148**, 117–131 (2018).
77. K. P. von Maubeuge and H. Ehrenberg, "Long-Term Resistance To Oxidation Of Pp And Pe Geotextiles," (n.d.).
78. Y. G. Hsuan, H. F. Schroeder, K. Rowe, W. Müller, J. Greenwood, D. Cazzuffi, and R. M. Koerner, "Long-term Performance and Lifetime Prediction of Geosynthetics," (n.d.).
79. X. Yang and X. Ding, "Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests," *Geotextiles and Geomembranes* **24**, 103–109 (2006).
80. X. Bai, C. Li, L. Ma, P. Xin, F. Li, and Z. Xu, "Quantitative analysis of microplastics in coastal tidal-flat reclamation in Dongtai, China," *Front. Environ. Sci. Eng.* **16**, 107 (2022).
81. X. Bai, F. Li, L. Ma, and C. Li, "Weathering of geotextiles under ultraviolet exposure: A neglected source of microfibers from coastal reclamation," *Science of The Total Environment* **804**, 150168 (2022).
82. R. Bhattacharyya, M. A. Fullen, K. Davies, and C. A. Booth, "Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control," *Geomorphology* **119**, 52–61 (2010).
83. "Natural Weed Control Mats – RoLanka Inc.," Rolanka International, Inc (2023).
84. "Jute Geotextile, Soil Saver Matting 1.8m x 25m Erosion Control," Aussie Environmental | Erosion Control, Silt Fences, Coir Logs, Jute Matting, Hydromulching, Hydroseeding | QLD Queensland 07 5315 5431 (2021).

85. O. Ogbobe, K. S. Essien, and A. Adebayo, "A Study of Biodegradable Geotextiles Used for Erosion Control," *Geosynthetics International* **5**, 545–553 (1998).
86. D. Marczak, K. Lejcuś, J. Grzybowska-Pietras, W. Biniaś, I. Lejcuś, and J. Misiewicz, "Biodegradation of sustainable nonwovens used in water absorbing geocomposites supporting plants vegetation," *Sustainable Materials and Technologies* **26**, e00235 (2020).
87. A. K. Behera, S. Avancha, R. K. Basak, R. Sen, and B. Adhikari, "Fabrication and characterizations of biodegradable jute reinforced soy based green composites," *Carbohydrate Polymers* **88**, 329–335 (2012).
88. T. Sanyal and K. Chakraborty, "Application of a bitumen-coated jute geotextile in bank-protection works in the Hooghly estuary," *Geotextiles and Geomembranes* **13**, 127–132 (1994).
89. J. Broda, J. Grzybowska-Pietras, A. Gawłowski, M. Rom, S. Przybyło, and R. Laszczak, "Application of Wool Geotextiles for the Protection of Steep Slopes," *Procedia Engineering* **200**, 112–119 (2017).
90. F. Tauro, P. Cornelini, S. Grimaldi, and A. Petroselli, "Field studies on the soil loss reduction effectiveness of three biodegradable geotextiles," *J Agricult Engineer* **49**, 117–123 (2018).
91. "Sheep's Wool Garden Felt - 100% natural, biodegradable & compostable," Chimney Sheep (2021).
92. M. R. Derrick, D. Stulik, and J. M. Landry, *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*, Scientific Tools for Conservation (Getty Conservation Institute, 1999).

## Lisa 1. Pesemata ja puhtast villast vilditud pallid



**Joonis L1.** Viltimistestil saadud vildipallid a) pesemata purustatud villast, b) pesemata purustamata villast ja c) puhtast villast võrdluses katses kasutatud villa kogusega

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Lauri Lopp,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Looduslikest kiujäätmetest geotekstiili valmistamine“, mille juhendaja on Tarmo Tamm, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **01.06.2026** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Lauri Lopp*

**02.06.2023**